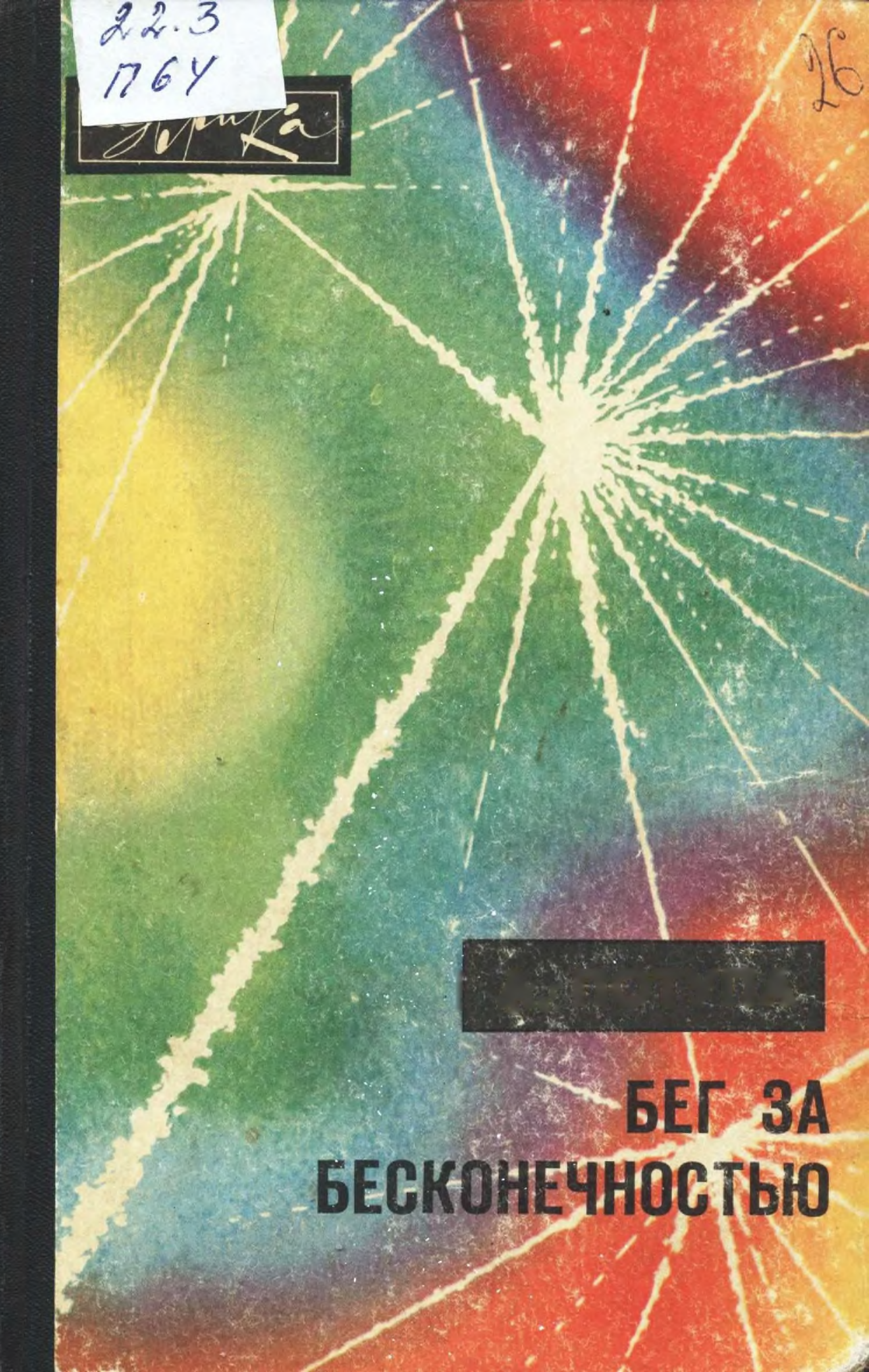


22.3
П64
26
А. ПОТУПА
БЕГ ЗА БЕСКОНЕЧНОСТЬЮ
[redacted]
БЕГ ЗА
БЕСКОНЕЧНОСТЬЮ

А. ПОТУПА

БЕГ ЗА БЕСКОНЕЧНОСТЬЮ

МОСКВА
«МОЛОДАЯ ГВАРДИЯ»
1977

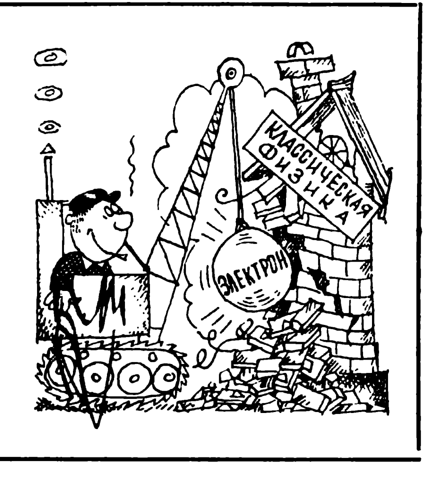
530.4
П64

П $\frac{70300-243}{078(02)-77}$ 64—77

Памяти отца
Сергея Николаевича

ГЛАВА ПЕРВАЯ,

В КОТОРОЙ ПРОИСХОДИТ ПЕРВОЕ ЗНАКОМСТВО С ОЧЕНЬ МОЛОДОЙ НАУКОЙ — ФИЗИКОЙ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ



Все опыты уязвляют двумя когтями — надеждой и любопытством.

О. Бальзак

РОЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРОНА

Позвольте представить вам одну из самых быстроразвивающихся областей современной науки — физику элементарных частиц. Представить не только во всем величии гигантских уникальных приборов, но и в тех, порой мучительных неясностях, которые всегда подстерегают дерзнувшего понять. Представить не только как совокупность ясных, твердо установленных фактов и положений, но и как великий путь эволюции наших взглядов на структуру вещества, вернее, как этап пути, начало которого подернуто полулегендарной дымкой историко-научных гипотез, а конец и вовсе не виден.

Как это следует из названия, раздел физики, который мы будем обсуждать, занимается свойствами простейших составляющих вещества, таких объектов, из которых на сегодняшний день не удалось выделить ничего более элементарного, чем они сами.

Главная проблема, стоящая перед физиками, заключается в выяснении природы сил, действующих между элементарными частицами в различных реакциях. По-видимому, эти же силы обусловливают и существование

самих частиц, и, в конечном счете, именно то строение окружающего мира, которое мы наблюдаем.

В принципе физика элементарных частиц очень молодая наука. В 1977 году ей исполняется ровно 80 лет, и она практически целиком принадлежит нашему веку. Первая элементарная частица, а следовательно, и первый объект этой науки — электрон — был открыт английским физиком Дж. Дж. Томсоном, знаменитым «Джи-Джи», в 1897 году. Так что мы вправе говорить не только о молодости, но, пожалуй, о юности этой науки.

Это звучит наилучшим комплиментом, если вспомнить высказывание академика В. Гинзбурга, который назвал физику элементарных частиц «самой красивой дамой физического королевства».

Ее родословная чрезвычайно интересна и поучительна, и нам вскоре предстоит отправиться в специальное путешествие по ее временам и теориям. А пока давайте обсудим то удивительное сочетание счастливой случайности и ясной целенаправленности поиска, которое непосредственно привело физиков к порогу микромира.

Один из путей к современной науке об элементарных частицах возник примерно в начале XVIII века в связи с исследованиями распространения электричества в разреженных газах. Эти исследования служили в свое время едва ли не образцом чрезвычайно сложной в техническом отношении и неблагодарной работы. Действительно, правильного понимания электрических явлений еще не было, а необходимость создания сосудов с высокой степенью разрежения газов, или, как говорят, с высоким вакуумом, порождала серьезнейшие трудности при постановке буквально каждого нового опыта.

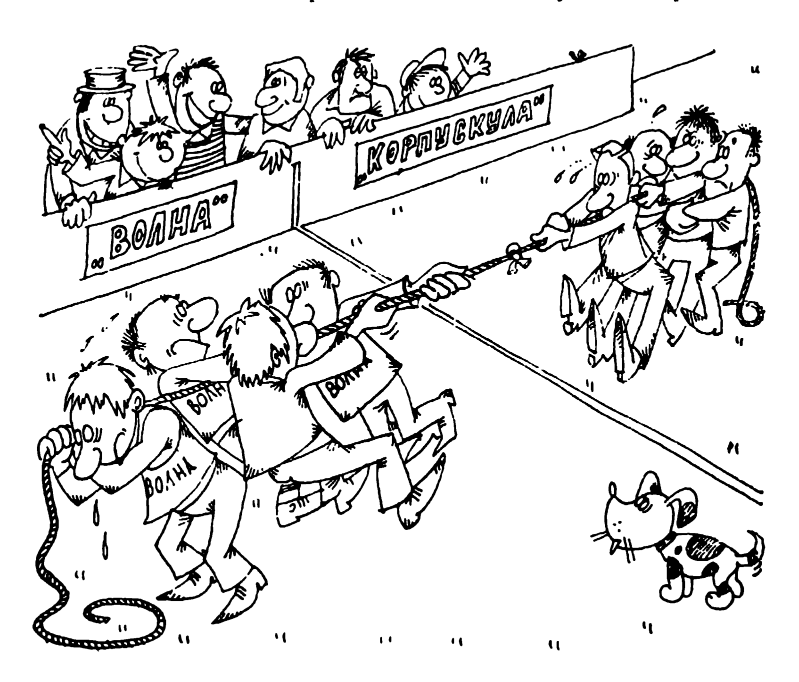
И неудивительно, что основной наградой большинству ученых, рискнувших взяться за такую работу, было чисто эстетическое наслаждение — они могли долго любоваться замечательным свечением, возникающим при электризации колбы с достаточно хорошим вакуумом. Удивительно, пожалуй, другое — упорство и изобретательность, несмотря на все проблемы и неясности, приносили прекрасные плоды. Так, русский ученый В. Петров, который одним из первых стал систематически изучать зависимость электрического разряда в газах от формы электродов, расстояния между ними,

уровня разрежения в сосудах, сделал в 1802 году открытие важнейшего явления — электрической дуги.

Решающий сдвиг в исследованиях стал возможен лишь после изобретения немецкого стеклодува Г. Гейслера, который в 1855 году предложил использовать для создания действительно хорошего вакуума принципиально новый ртутный насос.

В течение последующего десятилетия изучение явлений в газонаполненных разрядных трубках поднялось на качественно новый уровень. Были повторены и значительно расширены все основные эксперименты, а главное — был твердо установлен особый вид свечения стеклянной оболочки колбы, так называемая флуоресценция, под действием неизвестных агентов, вылетающих с отрицательно заряженного электрода — катода. Этот эффект смогли не только обнаружить, но и довольно подробно исследовать именно в вакуумных трубках с чрезвычайно высоким разрежением. Таинственные агенты, вызывающие свечение, были названы *катодными лучами*.

Однако после открытия катодных лучей потребова-



лось еще несколько десятилетий для того, чтобы уверенно отождествить их с потоком элементарных частиц вещества. Вокруг результатов основных экспериментов разгорелась настоящая война идей.

Ряд крупных физиков полагали, что катодные лучи имеют ту же природу, что и свет, то есть катод излучает некоторые волны. К лагерю волновиков примыкал, в частности, первооткрыватель электромагнитных волн Г Герц. Даже сам автор термина «катодные лучи» немецкий физик Э. Гольдштейн, который сделал первое подробное описание их характеристик, был уверен в правильности прямой аналогии со световыми явлениями.

Точка зрения противников сводилась к тому, что новые лучи состоят из отдельных заряженных частиц, как говорили в те времена, корпускул. Сторонники корпускулярной гипотезы в конечном счете восторжествовали, и главная заслуга в этом принадлежит двум английским ученым У. Круксу и Дж. Дж. Томсону.

У. Крукс — типичный представитель ученого мира старых, добрых времен. Человек разнообразных интересов, он внес весомый вклад в развитие нескольких областей естествознания, например, именно он открыл химический элемент таллий.

Основные достижения У. Крукса были связаны с его работами по газоразрядным трубкам и глубокими исследованиями свойств катодных лучей. Исключительная изобретательность в создании трубок различных конфигураций с самой разнообразной внутренней «начинкой» позволила ему доказать, что новые лучи распространяются прямолинейно, могут отклоняться магнитным полем и обладают импульсом. Очень важно и то, что У Крукс сумел заглянуть за границы, очерченные доступными ему опытными данными, — он, по-видимому, первым предсказал, что заряженные частицы, вылетающие из катода, являются особым, не сводящимся к уже известным, состоянием вещества.

Однако возражения противников корпускулярной гипотезы и после замечательных экспериментов У. Крукса не были устранены. В борьбе научных идей опыт действительно главный судья, но, к сожалению, не только одного, а порой и десятка независимых опытов не хватает для строгого выбора между двумя конкурирующими гипотезами.

Само существование противоположных мнений по поводу одного и того же явления — наилучший способ ускорить постановку опытов, способных разрешить все споры. Другой вопрос, что не всегда имеется возможность немедленно добиться решения именно таким естественным путем, например, из-за несовершенства экспериментальной техники.

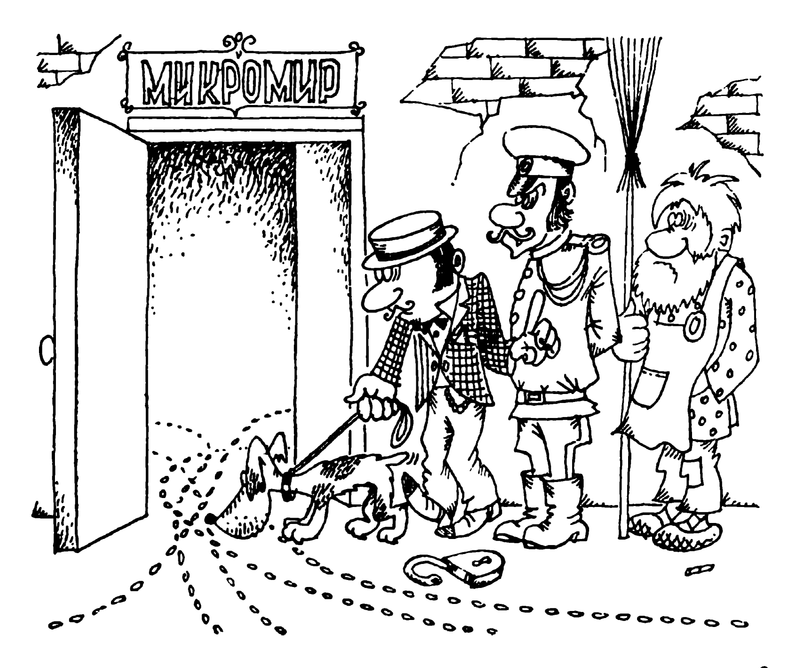
Какие же преграды стояли на пути корпускулярной гипотезы о природе катодных лучей после работ У. Крукса? В последнее десятилетие XIX века этим работам и блестящему исследованию двадцатипятилетнего французского физика Ж. Перрена, который доказал, что новые лучи переносят отрицательный электрический заряд, противостояли удивительные результаты самого Г. Герца, ставшего к тому времени благодаря открытию радиоволн одним из крупнейших авторитетов в экспериментальной физике. А результаты Г. Герца были и впрямь поразительны. Несмотря на превосходное владение методами постановки самых тонких опытов, он не сумел обнаружить отклонение катодных лучей в электростатическом поле. Разве могут добропорядочные электрически заряженные частицы не реагировать на такое поле? Но почему же тогда они ведут себя как следует под действием магнитов?

Так, буквально на самом пороге нового века, уже у готовой, ладно сбитой колыбели физики элементарных частиц возникла трудная, пожалуй, даже загадочная ситуация.

Решение было найдено Дж. Дж. Томсоном. Он рассуждал просто и убедительно. Если катодные лучи во всех других экспериментах вели себя как заряженные частицы, то они непременно должны отклоняться электростатическим полем. Если этого не наблюдается, то «виноваты» не обязательно лучи, возможно, «виновато» поле, которое просто не проникает в трубку. Но экранировать такое поле способен лишь хороший проводник (электростатическое поле в проводящую среду не проникает), а стекло трубки таковым не является, значит, проводящей средой является остаточный воздух внутри трубки. Дальнейшее было, как говорится (к сожалению, только «как говорится»!), делом техники. Давление газа было заметно понижено, и необходимое отклонение катодных лучей стало экспериментальным фактом.

Впоследствии, добиваясь взаимной компенсации отклонений с помощью одновременного наложения известных электрических и магнитных полей, Дж. Дж. Томсон сумел определить такую важную характеристику новых частиц, как отношение заряда к массе $\frac{e}{m}$. Именно эта величина, а не заряд и масса по отдельности, была доступна в то время прямому измерению. С этого момента и отсчитывается обычно дата открытия **электрона** и рождения всей физики элементарных частиц.

Конечно же, решение одной крупной задачи немедленно повлекло за собой постановку других задач, проясняющих ситуацию с новыми частицами. В этом смысле 1897 год — не более чем удобная и вполне разумно выбранная мемориальная вешка в биографии электрона. Достаточно сказать, что сам этот термин был придуман раньше и относился совсем к иному объекту. Англичанин Дж. Стони, тщательно исследовавший открытое М. Фарадеем явление электролиза, назвал электроном отрицательный заряд одновалентного



иона еще в 1891 году. Поэтому в отношении новой частицы довольно долгое время существовала изрядная терминологическая неразбериха — ее отмечали в литературе и как «ион», и как «электрон», и как «корпускулу электричества» (последнее название употреблял сам «Джи-Джи»). Как ни странно, эта путаница оказывала заметное влияние на научные выводы ряда работ, но уже с первых лет нового века недоразумение было полностью устранено.

Примерно к тому же времени завершился цикл экспериментов Дж. Дж. Томсона, Ч. Вильсона, Р. Милликена по измерению заряда и массы электрона.

Так электрон окончательно вошел в физику, но отнюдь не для того, чтобы занять подходящий для легчайшей частицы вещества скромный дальний уголок, а с явными революционными намерениями, и действительно, примерно за десять-пятнадцать лет своего существования он полностью подорвал фундамент классической науки. Роль открытия электрона превосходно характеризуется следующим высказыванием английского ученого Г. Липсона: «Физика, да и вообще вся жизнь на Земле, теперь уже никогда не сможет быть такой, как до этого открытия».

Мы в определенной степени сумели убедиться, что открытие электрона — длительный и многотрудный процесс, но он дает представление лишь об одном из путей к физике элементарных частиц. На самом деле у колыбели этой науки образовался целый оживленный перекресток. Сюда широкими столбовыми дорогами и узенькими, едва заметными тропинками стекались практически все главные трудности физики XIX века.

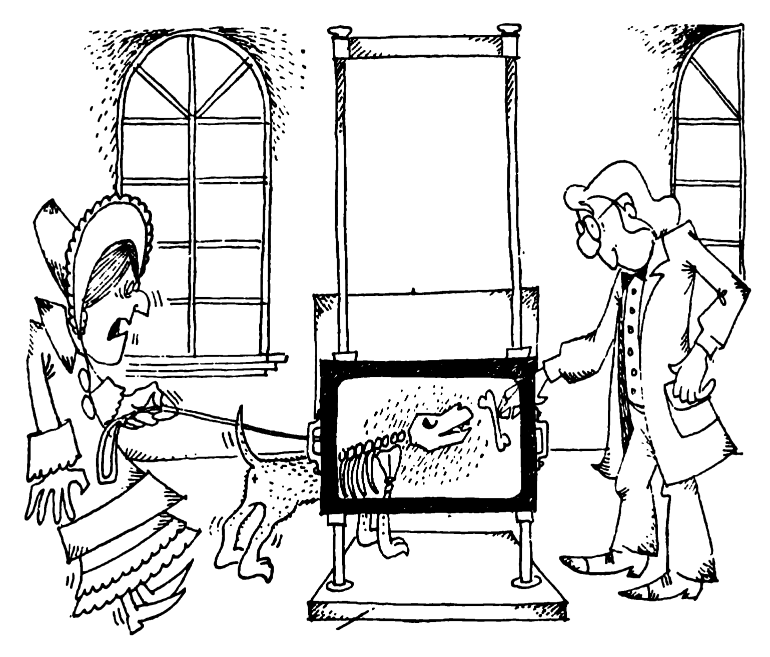
У ПЕРЕКРЕСТКА ЗАГАДОК

Лет сто назад в физике возник взрывообразный интерес ко всякого рода таинственным и загадочным излучениям и свечениям. Пышные прилагательные в этом предложении вовсе не дань возвышенному стилю и некоторой склонности к мистико-романтической образности, характерной для популярных корреспонденций тех времен. Наблюдалось, действительно, множество различных излучений: светился остаточный газ и флуоресцировала стеклянная колба в уже знакомых нам экспе-

риментах с газоразрядной трубкой, красиво фосфоресцировали соединения урана, наконец, в 1887 году мир узнал, что «генератор Герца» излучает какие-то невидимые электромагнитные волны... Причем большинство из этих излучений не могли быть сколь-нибудь глубоко объяснены. Отсюда и вполне понятный ореол таинственности.

Однако «лучевой бум» оказался теснейшим образом связанным с результатами последнего пятилетия прошлого века. В самом конце 1895 года немецкий физик К. Рентген обнаружил, что из точки пересечения потока катодных лучей со стеклянной оболочкой трубки исходит странное излучение, вызывающее флуоресценцию ряда веществ и обладающее невероятной проникающей способностью. Открытие *X*-лучей, как окрестил их сам К. Рентген, обессмертило его имя: он стал через шесть лет первым в истории лауреатом Нобелевской премии.

Сейчас мы настолько привыкли к рентгеновским лучам, рентгеновским установкам, наконец, к врачам-рентгенологам, что вряд ли способны представить современ-



ную медицину без всего этого. Кстати, исключительная популярность К. Рентгена и его работ — а он стал широко известен буквально через несколько месяцев после своего знаменитого доклада в Вюрцбургском университете — связана именно с чрезвычайно скорым прикладным использованием его метода в медицинских целях. Уже через год-два после открытия каждый, кто приходил на публичные демонстрации, которые охотно устраивали физики, мог полюбоваться контурами своего скелета. Разумеется, это было зрелище не для слабонервных, но оно в высшей степени подогревало общественный интерес к поиску новых явлений.

И открытия еще более удивительные и глубокие не заставили себя ждать. Всего через 4 месяца после обнаружения рентгеновских лучей французский физик А. Беккерель, достойный представитель научной династии Беккерелей (его дед, отец и сын также известные физики), что называется, обручился со счастливой случайностью. Настолько счастливой, что она стала чуть ли не хрестоматийным примером редкого везения.

Разумеется, дело не только в везении. А. Беккерель по давно установившейся семейной традиции тщательно изучал эффект фосфоресценции различных веществ. После достаточно длительной экспозиции на обычном солнечном свете некоторые вещества продолжали светиться (фосфоресцировать) и при переносе в темное помещение. Это явление было известно довольно давно и уже применялось на практике, например, в часах со светящимся циферблатом. Одним из самых лучших фосфоресцентов считалась двойная сульфатная калий-урановая соль, которая часто использовалась в экспериментах и А. Беккерелем.

Вскоре после появления первых сообщений об открытии всепроникающих рентгеновских лучей он решил проверить, не испускают ли фосфоресценты подобного излучения. С этой целью А. Беккерель начал выставлять на солнечный свет образцы урановой соли, расположенные на фотопластинках, тщательно обернутых непрозрачной бумагой. Образцы достаточно четко отпечатывались на пластинке, то есть проникающее излучение действительно существовало.

А. Беккерель был, несомненно, воодушевлен первыми успехами, но, по-видимому, уверовал, что найден

новый способ получения рентгеновских лучей. Он с увлеченностью охотника, напавшего на верный след, ставил опыт за опытом, пока не столкнулся с одной досадной помехой. Однажды он готовил очередной эксперимент, но погода испортилась, и ему пришлось запереть все устройство в ящик письменного стола. Собранная схема предназначалась для изучения экранирующего действия металлов, в частности, между защищенной фотопластинкой и образцом урановой соли помещался небольшой медный крест. Примерно через сутки А. Беккерель установил, что пластинка безнадежно испорчена — на ней виден довольно четкий отпечаток креста.

История умалчивает об этом, но я почему-то не сомневаюсь, что сразу после проявления фотопластинки А. Беккерель испытал некоторое раздражение. Еще бы! Опытнейший 43-летний экспериментатор должен был позаботиться о ее сохранности. Ведь к этому времени многие (и он в том числе) знали, что прекрасные фосфоресценты — соли урана — обладают вредным побочным действием, портят фотопластинки. Я не сомневаюсь и в том, что чувство досады очень скоро уступило место восторгу истинного первооткрывателя. Ведь результат «эксперимента поневоле» позволял утверждать, что солнечное освещение было вообще ни при чем, а соли урана сами испускали некоторое излучение. Вскоре А. Беккерель убедительно показал — новое излучение связано только с урансодержащими веществами; все остальные образцы независимо от их фосфоресцентной способности никакого эффекта не давали.

Через несколько лет А. Беккерель и другие физики выяснили, что новое излучение обладает сложным составом из трех компонент: одна из них — альфа (α) — несет положительный электрический заряд и сильно поглощается в веществе, вторая — бета (β) — отрицательно заряжена и, как и третья, нейтральная — гамма (λ) — компонента, обладает значительно большей проникающей способностью. Так в физику вошли представления об альфа-, бета- и гамма-излучениях, которые были расценены как прямые сигналы о превращениях, происходящих в самых глубинах атомного мира.

Забегая немного вперед, следует сказать, что альфа-излучение оказалось потоком атомных ядер гелия, состоящих из четырех элементарных частиц: двух прото-

нов и двух нейтронов, а бета-и гамма-излучения — потоками элементарных частиц: быстрых электронов и жестких фотонов (квантов электромагнитного поля), соответственно. Они, действительно, были прямыми сигналами, но не из атомного, а из ядерного мира, представляющего в определенном смысле более глубокий уровень строения вещества.

Очевидно, физиков того времени не следует упрекать в неточности, ведь они не успели еще как следует разобраться в атомной структуре. Само слово «атом» зачастую употреблялось по отношению к иным объектам, например, как мы помним, электрон тоже называли «атомом электричества». В следующей главе вы увидите, что законы такого словоупотребления были связаны скорее с некоторой философской традицией, а не с особым физическим содержанием.

Замечательное открытие А. Беккереля заинтересовало многих физиков, в том числе супругов П. и М. Кюри и Э. Резерфорда. Супруги Кюри, пожалуй, самая выдающаяся в истории науки «семейная лаборатория», привнесли в дело присущее им сочетание талантов и широкий размах. Именно они ввели термин «радиоактивность», обозначив им способность некоторого вещества излучать, подобно урану. Им же принадлежит заслуга в открытии некоторых радиоактивных элементов.

Главное среди этих открытий, несомненно, радий, излучение которого оказалось примерно в миллион раз сильнее, чем у урана. Для оценки роли, сыгранной этим редчайшим элементом в становлении современной физики, не хватит обилия всех похвальных слов, всех превосходных степеней, содержащихся в русском языке. Благодаря огромной интенсивности радиации радий не только дал возможность разгадать ее природу, но и стал на целых три десятилетия уникальным инструментом для проникновения в микромир.

Работы в этих направлениях неразрывно связаны с именем Э. Резерфорда, которого справедливо называют отцом современной ядерной физики. Научное дарование и характер Э. Резерфорда как нельзя лучше соответствовали тому бурному сокрушению основ, которое происходило в физике на рубеже столетий. Он обладал феноменальной интуицией и, как правило, оказывался в самых интересных и «горячих» точках научных разработок, совершенно фантастической изобретательностью

в трудных, для подавляющего большинства современников непреодолимых, экспериментальных ситуациях. И наконец, ему было присуще поразительное чутье на таланты — из резерфордовской школы вышло с добрый десяток лауреатов Нобелевской премии.

Вклад Э. Резерфорда в изучение радиоактивности велик и многообразен. Достаточно отметить, что свою Нобелевскую премию он получил именно за фундаментальные работы в этой области. Одно из исследований Э. Резерфорда, завершенное примерно в 1908 году, сыграло поистине определяющую роль в дальнейшем штурме микромира: речь идет об установлении природы альфа-излучения.

Это была сложная проблема, лишь постепенно поддававшаяся решению. Уже к 1903 году Э. Резерфорд доказал, что альфа-излучение представляет собой поток положительно заряженных частиц. После многочисленных измерений традиционно важного отношения заряда к массе стало ясно, что альфа-частицы принадлежат к атомному миру; но доступная точность этих экспериментов, к сожалению, была слишком мала для того, чтобы сделать окончательные количественные заключения.

Казалось бы, прямой путь к разгадке природы альфа-частиц на неопределенное время заказан; надо ожидать, пока технические усовершенствования позволят должным образом улучшить точность опытов. Но не был бы Резерфорд Резерфордом, если бы не предпринял очень характерный для него блестящий обходной маневр — раз альфа-частицы не желают выдавать своих секретов поодиночке, их надо собрать в большой коллектив и устроить в образовавшемся газе электрический разряд. При этом должно возникнуть определенного вида свечение со своим, присущим только данным атомам спектром. Дальше остается только воспользоваться каталогом уже известных спектров и отождествить по нему добытые результаты.

Конечно же, все это просто выглядит лишь на бумаге; на деле все обстояло куда сложней. Так, для проведения данного эксперимента в резерфордовской лаборатории был создан уникальный прибор, потребовавший исключительно виртуозной работы стеклодувов. Но, несмотря на все трудности, опыт прошел вполне успешно, и Э. Резерфорд увидел в некоторой мере предугаданную им картину: альфа-частицы оказались не

чем иным, как полностью ионизированными атомами гелия.

Сразу же после этого открытия основные функции альфа-частиц в резерфордовской лаборатории резко меняются — из загадочного объекта они превращаются в надежный инструмент исследований.

Я бы хотел немного обсудить этот интересный и весьма типичный прием научной работы.

В общем-то, любое известное явление несет в физике своеобразную двойную нагрузку. Оно, если можно так выразиться, «учится и работает» одновременно, точнее — оно само подвергается изучению и используется неким образом для изучения других явлений. Любопытно, что правильное понимание механизма этого явления нередко наступает уже после многократного и плодотворного применения. Обратимся к примерам.

Катодные лучи помогли открыть рентгеновское излучение и установить многие его свойства еще до знаменитой томсоновской работы. В свою очередь, рентгеновские лучи стали активно применяться не только в физических, но и в прикладных медицинских целях лет за 10—15 до установления их природы. Только в 1912 году немецкий физик М. Лауэ доказал, что рентгеновские лучи рассеиваются на элементах кристаллической решетки подобно тому, как обычные волны рассеиваются на щелях или малых препятствиях. Этот замечательный эксперимент вошел в историю науки, пожалуй, как самый яркий пример на тему: «убить двух зайцев сразу» — ведь была не только обнаружена волновая природа рентгеновского излучения, но и открыт путь к прямому изучению атомно-молекулярной структуры кристаллов.

Показательна в этом плане судьба первой элементарной частицы — электрона. Сразу же после «появления на свет» он зарекомендовал себя как активнейший труженик науки, хотя даже основные его характеристики были известны весьма приближенно — значение заряда и массы электрона подвергалось в первые годы многим существенным уточнениям. Однако самая важная область современной прикладной физики — электроника, без которой сейчас немыслимы ни наука, ни техника, ни прямая трансляция хоккейных матчей из Канады, — на пару лет старше самого электрона. Ее возраст отсчитывается, как правило, от уже упоми-

навшейся работы Ж. Перрена, эксперименты которого велись в 1895 году с использованием самой настоящей электронно-лучевой трубки.

Честно говоря, мы и теперь не готовы к полному ответу на вопрос: что такое электрон? Старейшина микромира — сплошной клубок проблем. Но это не мешает постигать с его помощью тончайшие детали строения материи и тем более не мешает, скажем, Министерству электронной промышленности планировать выпуск точных и сверхточных приборов.

Один из впечатляющих примеров на эту тему как раз и связан с альфа-частицами. После экспериментов 1908 года Э. Резерфорд решил применить их в качестве снарядов для прямого зондирования структуры вещества, пока еще не догадываясь, что в его руках находятся натуральные атомные ядра. Но, даже выступая инкогнито, альфа-частицы блестяще справились со своей задачей и, к немалому удивлению Э. Резерфорда, значительно «перевыполнили план». Бомбардируя тонкие образцы золотой фольги этими замечательными снарядами, Э. Резерфорд и его ученики заметили любопытное явление. Подавляющее большинство альфа-частиц без труда пронизывали образец, но в отдельных случаях они отскакивали почти в противоположном направлении, или, выражаясь физическим слогом, рассеивались на углы, превышающие 90 градусов. Характеризуя степень недоумения, возникшего в лаборатории сразу же вслед за первыми наблюдениями подобного «чуда», Э. Резерфорд сравнивал резкое отклонение альфа-частицы с отскоком могучего артиллерийского снаряда от листка папиросной бумаги.

Между тем этот великий эксперимент, принципиальная схема которого легла в основу всей экспериментальной ядерной физики XX века, впервые позволил увидеть строение атомов. А непосредственная интерпретация сводилась к следующему. Вещество образца в основном прозрачно для альфа-частиц, но в него как бы вкраплены отдельные центры, несущие довольно большой положительный электрический заряд и имеющие чрезвычайно малый (по сравнению с атомным!) размер, причем именно в них сосредоточена вся масса вещества. Изредка налетая на такие центры, положительно заряженные альфа-частицы испытывали сильное отталкивание согласно закону Кулона для одноимен-

ных зарядов и рассеивались на очень большие углы. Отсюда и был сделан вывод о существовании атомных ядер. Поскольку атомы в целом электронейтральны, большой целочисленный (в единицах заряда электрона) положительный заряд каждого ядра должен компенсироваться соответствующим числом отрицательно заряженных электронов в атоме.

Так появилась знаменитая резерфордовская модель атома, работа над которой была завершена к 1911 году. В настоящее время картинка — несколько электронных орбит вокруг центрального ядра, наглядное изображение этой модели — стала своеобразным символом ядерных исследований.

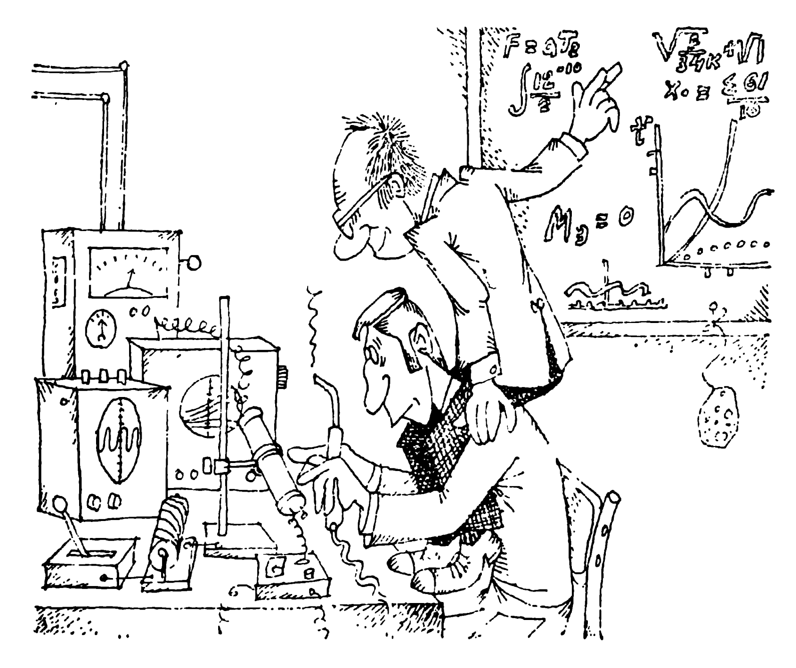
Впрочем, рассказ об этом открытии нуждается, по крайней мере, в одном очень полезном уточнении. Планетарный (по аналогии с изображением солнечной системы) образ атома отнюдь не обязан своим появлением результатам резерфордовских экспериментов. Он зародился гораздо раньше. Еще в 1903 году японский физик Х. Нагаока в докладе на заседании Токийского физико-математического общества выдвинул модель, где электронные оболочки располагались вокруг центрального тела наподобие колец планеты Сатурн. Через пару лет к разработке планетарной схемы строения атомов приступил Дж. Стони. Существовали и конкурирующие модели. Самая важная среди них была сформулирована учителем Э. Резерфорда Дж. Дж. Томсоном вскоре после открытия электрона. Дж. Дж. Томсон полагал, что электроны атома плавают в некотором облаке положительно заряженного вещества; и до поры до времени его идеи не противоречили результатам измерений.

В общем, исследования Э. Резерфорда и его сотрудников возникли не на пустом месте, более того, они были специально направлены на выяснение роли положительного электричества в атомной структуре. Значение их открытия трудно переоценить, но нельзя и забывать, что оно было серьезно подготовлено предшествующими теоретическими гипотезами.

Такая подготовка играет в физике всегда очень большую роль, поскольку эксперимент и теория состоят, вообще говоря, в весьма сложных взаимоотношениях. Казалось бы, куда проще: экспериментатор задал вопрос Природе, получил ясный ответ, потом пришел тео-

ретик, написал нужное уравнение, получил подходящее решение и нарисовал несколько простых картинок для объяснения своей заумной математики нормальными человеческими понятиями. Если экспериментатор ошибся и через какое-то время даст теоретику совсем противоположные результаты, то последний волей-неволей начнет говорить о совсем иных решениях, нарисует новые картинки и... снова не менее успешно объяснит новые данные. Недаром ведь по поводу способности теоретиков «объяснять что угодно» едва ли не в каждой крупной лаборатории существуют анекдотические, но вполне правдивые истории.

Разумеется, в нарисованную здесь примитивную схему может поверить только несведущий человек. Ни один опыт никогда не ставился без определенной цели, по принципам известного сказочного персонажа — «пойди туда, не знаю куда, принеси то, не знаю что». Экспериментатор всегда имеет некоторое предварительное представление о том, что следует искать. Это представление может быть весьма приближенным и даже в конечном счете неправильным, но оно обязательно существует.



Физики часто характеризуют такую ситуацию мудреным на первый взгляд оборотом: «Экспериментатор работает под определенную модель». По существу же, идея крайне проста. До постановки опыта всякое угадывание конечных результатов эквивалентно формулировке той или иной теоретической гипотезы. Гипотезу можно выдвинуть на основе уже существующей модели или придумать собственную оригинальную модель — это дело опыта и возможностей. Можно вообще ничего не придумывать, а выяснять мнение у находящихся поблизости авторитетных коллег! Но в любом случае поставленный эксперимент в первую очередь послужит целям проверки той модели, на которую ориентируется его автор.

Обратимся еще раз к истории открытия радиоактивности. Под какую модель работал А. Беккерель?

Основная его гипотеза заключалась в том, что фосфоресцирующие вещества могут испускать наряду с видимым светом еще и проникающее излучение типа рентгеновского. Первым опытам А. Беккереля как раз и предстояло дать ответ на вопрос: могут или не могут?

Результаты оказались положительными и были немедленно опубликованы. Их ценность заключалась именно в том, что они не противоречили принятой модели, более того, первоначально А. Беккерель был уверен, что доказал свою гипотезу. И лишь после известного нам казуса (я уверен, что плохая погода сослужила верную службу не одному выдающемуся достижению в физике) он исключил из своей гипотезы предположение, будто таинственное излучение связано с влиянием солнечного света, а вскоре и предположение, что оно связано с фосфоресценцией. Постепенно у него сформировалась новая модель: вещество испускает излучение неизвестной природы, если в состав образца включен уран; причем основные свойства этого излучения — высокая проникающая способность и независимость от внешних воздействий на источник. Именно последнее свойство резко отличало «лучи Беккереля» от рентгеновских лучей, которые были неразрывно связаны с работой катодной трубки.

Да, теория не пассивный созерцатель, а активный соавтор в добыче новых экспериментальных фактов. Без фактов может остаться на долгое время в тени любая, даже самая интересная идея, но и самый важный

факт может «проскочить» мимо исследователя, если тот не вооружен соответствующими гипотезами. Это один из наиболее универсальных законов развития науки, и всякое крупное его нарушение сопровождается грустным комментарием историков: «Такая-то работа значительно опередила свое время и осталась почти незамеченной», или: «Время такого-то открытия еще не наступило».

Мало кому сейчас известно, что в середине прошлого века В. Вебер, прославившийся работами по электромагнетизму и изобретениями многих приборов, развил теорию, в которой фигурировали «атомы электричества», вращающиеся вокруг центрального ядра, и оказался, по-видимому, первооткрывателем планетарной модели атома. Несомненно, его идеи повлияли на ряд последующих поисков. Но, как мы помним, даже появившиеся через 50—60 лет после веберовских работ модели Х. Нагаока и Дж. Стони, основанные не на гипотезе, а на факте существования электрона, обратили на себя внимание лишь в связи с экспериментами в резерфордовской лаборатории. А вот другой факт из истории физики. Еще в 1887 году А. Шустер, варьируя отклонения катодных лучей в магнитном поле, измерил отношение заряда к массе для частиц, из которых, по его мнению, состояли эти лучи.

Таким образом, при наличии более развитых теоретических представлений дата рождения физики элементарных частиц могла сдвинуться вниз на целых 10 лет! Да что уж там 10 лет! В истории науки имеются куда более поразительные примеры. Теоретическая недостаточность построений Аристарха Самосского, который впервые пытался обосновать наблюдениями гелиоцентрическую картину солнечной системы, но был абсолютно уверен в строго круговой форме планетарных орбит, примерно на 17 веков задержала развитие научной астрономии.

На фоне всех этих, в общем-то, несложных правил и примеров явно выделяется один очень интересный эффект, который я обозначил бы как «феномен предоткрытия». Этот эффект сыграл настолько выдающуюся роль в период зарождения физики элементарных частиц, да и на всех последующих этапах ее развития, что на его описании просто нельзя не остановиться.

Что мы понимаем под открытием? Прежде всего

экспериментальные результаты, которые позволяют включить в систему научного знания новый объект или новое явление. Не так ли? Но как быть в том случае, когда новый объект или явление начинает активную жизнь в научной теории задолго до их экспериментального обнаружения, по крайней мере, до прямой регистрации?

«А разве такое возможно?» — спросит скептик.

«Не вижу никаких сложностей, — ответит ему эрудит. — Целые планеты открывались сначала «на кончике пера». Просто один ученый может сделать теоретическое предсказание, а потом он сам или кто другой ставит опыт и проверяет, справедливо ли оно. Только после опыта следует говорить о настоящем открытии. Но, конечно, и предсказание дает немалый вклад в общее дело — оно заставляет поторопиться с постановкой важных экспериментов».

Эрудит в основном прав. Он высказал довольно распространенное мнение, но не учел одного любопытного обстоятельства — очень часто теоретически предсказанные объекты или явления играют в науке гораздо более ответственные и полезные роли. Происходит это приблизительно так.

Во многих случаях между теоретической гипотезой и ее экспериментальным подтверждением или опровержением ученые успевают несколько раз (а то и десятки раз!) сменить календарь. Идут годы, часть предсказаний устаревает, о них потихоньку забывают, как говорится, сдают в архив. Другую же часть ожидает совсем иная судьба — интерес к ним не затухает, а, наоборот, все сильней разгорается, по поводу гипотетических объектов ведутся споры на конференциях, им посвящают научные статьи, даже целые монографии. Причины такого интереса нетрудно установить. Гипотеза начинает все шире применяться для развития самой теории, на ее основе пытаются объяснить результаты широкого круга экспериментов. Первые же успехи на этом пути еще больше подталкивают ученых к убеждению, что идея хороша и ею стоит заняться подробней. Иногда благодаря многолетней активной работе исследователей гипотетические объекты настолько хорошо вписываются в свой раздел науки, что в момент появления долгожданных прямых экспериментальных доказательств мало кто из

современников способен удержаться от легкого всплеска недоумения: «Ну и что! Все и так об этом знали...»

Замечательные превращения некоторых теоретических гипотез в почти достоверные факты и составляют суть «феномена предоткрытия». Предварительность, явно звучащая в этом термине, не случайна. Многие предоткрытия, даже попавшие на страницы учебников в качестве прописных истин, так и не избавились от приставки «пред». Последующие эксперименты их не подтвердили, и они были забыты так же прочно, как и рядовые неудачные предсказания. С примерами на эту тему нам еще предстоит встретиться, а пока обратимся к рассказу о более счастливых ситуациях.

НА АРЕНЕ ПОЯВЛЯЮТСЯ ФОТОН И ПРОТОН

На роли патриархов физики элементарных частиц наряду с электроном претендуют, по крайней мере, еще две частицы — фотон и протон. Помимо многих и весьма разнообразных заслуг перед наукой, они представляют собой превосходные образцы объектов, предоткрытых задолго до непосредственного экспериментального обнаружения.

В последние десятилетия прошлого века было установлено, что поверхности любых металлов способны испускать поток отрицательно заряженных лучей не только под действием разности потенциалов, но и при сильном их разогреве или при падении на их поверхность света. Эти явления были названы термоэлектрическим и фотоэлектрическим эффектами соответственно. Сразу же вслед за разгадкой природы катодных лучей исследователи доказали, что оба указанных эффекта тоже сводятся к испусканию потока электронов.

Таким образом, на пороге XX века в физику вошло довольно ясное представление об электроне как о непременной составляющей структуры вещества. Действительно, практически любой доступный экспериментатору образец вещества можно было заставить испускать поток электронов, подействовав одним из трех факторов: разностью потенциалов, теплом или светом. В общем, была понятна и роль каждого из этих факторов — они представляли собой просто разные способы сообщить электрону, заточенному в веществе, некоторую энергию,

необходимую для его вызволения. Но разве физики могут удовлетвориться только таким, чисто качественным объяснением! Необходимо было согласовать основные закономерности всех эффектов с существовавшей в то время теорией. Но именно на этом пути исследователи столкнулись с неожиданными и, казалось бы, непреодолимыми препятствиями.

Надо сказать, что как раз на рубеже столетий произошло крайне важное для теоретической физики событие — окончательно оформилась классическая электродинамика, претендовавшая на полное и последовательное описание электрических и магнитных явлений. Великая заслуга создателей этой науки — английских физиков М. Фарадея и Дж. Максвелла состояла в том, что они ввели в рассмотрение новый объект, особое состояние материи — электромагнитное поле. Благодаря этому все известные электрические, магнитные и даже световые явления можно было свести к нескольким фундаментальным законам распространения электромагнитного поля в пространстве и его взаимодействия с электрическими зарядами. После того, как на арену физических исследований вышла первая элементарная частица — электрон, усилия теоретиков и экспериментаторов сосредоточились на поиске конкретных закономерностей его поведения под действием электромагнитного поля.

Этот пункт оказался своеобразным средоточием веры и надежды. Физики верили в классическую электродинамику, которая позволила единым образом описать десятки разрозненных фактов в блестящем согласии с опытными данными. Поэтому они вполне серьезно надеялись на успех теории и в применении к электронам. Дело было, конечно, не только в простой надежде на успех. Вопрос ставился принципиально: справится ли существующая теория с описанием взаимодействия электромагнитного поля с электроном — мельчайшей структурной составляющей вещества? Положительный ответ на этот вопрос оказался бы величайшим триумфом теории, а отрицательный—наносил непоправимый ущерб ее основам.

В такой ситуации подробное изучение фотоэффекта давало физикам исключительную возможность для экспериментальной проверки теоретических предсказаний. Согласно классической электродинамике свет пред-

ставляет собой совокупность электромагнитных волн — именно в форме волн проявляется электромагнитное поле в этом случае. Всякую волну можно характеризовать, например, интенсивностью и частотой (или величиной, обратно пропорциональной частоте, — длиной волны). Чем интенсивней поле, тем больше энергии оно несет. Что же происходит во время фотоэффекта?

Чтобы вырвать с поверхности металла электрон, каким-то образом связанный с остальными элементами вещества, электромагнитная волна должна «накачивать его энергией» до тех пор, пока эта связь не порвется, то есть кинетическая энергия электрона превзойдет по абсолютной величине его потенциальную энергию. После этого электрон покидает образец вещества с некоторой скоростью. В такой картине ясно, что чем интенсивней свет, тем большую энергию способен он передать электрону и тот будет вылетать из образца с большей скоростью.

Между тем экспериментальные данные по фотоэффекту давали совсем иную, весьма странную с точки зрения электродинамики картину. Начнем с того, что от интенсивности света, падающего на образец вещества, зависело только количество вылетающих электронов. Чем более интенсивный источник света использовался в опыте, тем больше электронов вылетало, тем сильней был вызываемый ими ток, регистрировавшийся специальным устройством. Скорость же электронов (или их кинетическая энергия) зависела только от длины волны падающего света! Удивительная ситуация — в результате облучения металлического образца, скажем, синим светом, электроны вылетали бы со значительно большими скоростями, чем в случае облучения красным светом. Но какова связь между окраской света и энергией, которую он передает электронам?

Известно было, что электромагнитные волны, соответствующие красному цвету, имеют большую длину волны, чем «синие» волны, то есть меньшую частоту. Но опять-таки классическая электродинамика не могла уловить связь между частотой и энергией.

Создалось весьма странное положение. С одной стороны, перед физиками лежала простая закономерность, добытая опытным путем: кинетическая энергия вылетающих электронов пропорциональна частоте света, которым облучают образец вещества. С другой стороны —

превосходная теория, объяснившая десятки гораздо более сложных явлений, здесь, в простейшем, казалось бы, но чрезвычайно важном случае, совершенно бессильна..: Естественный и очень красивый выход был предложен в 1905 году двадцатишестилетним А. Эйнштейном.

Этот год стал звездным не только для скромного клерка Швейцарского патентного бюро, успевшего буквально за несколько месяцев написать основополагающие статьи по квантовой теории и теории относительности, но и для всей физики XX века. Одна из этих статей и была посвящена разрешению загадок фотоэффекта.

А. Эйнштейн предположил, что поток электромагнитного излучения, падающий на поверхность вещества, можно представить как совокупность отдельных частиц — световых квантов; причем энергия каждого кванта пропорциональна частоте света или, что то же самое, обратно пропорциональна длине волны. Это была воистину революционная идея, так как очень уж трудно совместить друг с другом противоположные представления — непрерывная, плавно меняющаяся в пространстве волна и поток частичек, несущих определенные энергию и импульс и занимающих каждая небольшую область пространства...

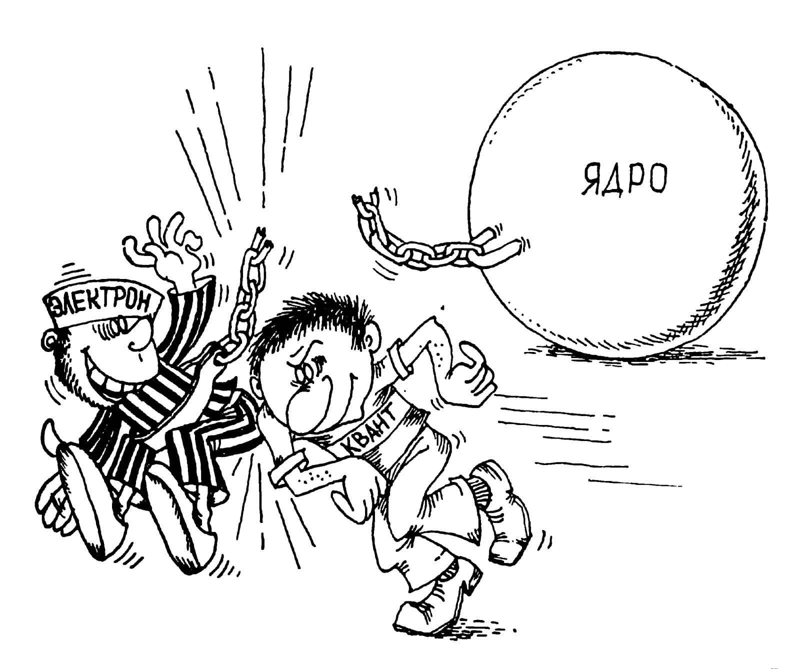
Каждый из вас, наверное, наблюдал такую приятную картину. Ленивая волна набегает на берег. В песке лежит небольшой камень, набегающая волна раскачивает его, камень сначала немного сдвигается в сторону берега, потом возвращается вместе с водой. Через некоторое время волны могут либо окончательно вытолкнуть его на берег, либо утащить с собой на «дно морское». Но вот подбежал мальчишка-озорник и швырнул горсть камешков в сторону моря. Они не долетели до воды, врезались в самую кромку волн. Представьте себе, что камешки были брошены довольно сильно и один из них попал в тот самый камень, за колебаниями которого вы так долго следили. От сильного удара он сорвался с места и сразу же исчез под водой.

Нечто подобное должно было происходить и при падении света на вещество. Вместо длительного раскачивания электрона — мгновенное соударение, в котором квант света (это и есть новая элементарная частица) передает электрону энергию, необходимую для того, чтобы тот порвал связи с атомом и вылетел на свободу. Так получается потому, что электрон очень мал и «чув-

ствует» зернистую структуру электромагнитного излучения, прерывистость электромагнитного поля. Когда же мы рассматриваем задачу о падении электромагнитных волн на большой и тяжелый объект, картина снова будет соответствовать представлению о непрерывном, плавно меняющемся поле.

Гипотеза световых квантов, несмотря на резкое противоречие с классической электродинамикой, не только утвердилась в физике, но вскоре стала применяться при описании механизма излучения атомом. Непосредственного доказательства существования новых частиц — световых квантов — пришлось дожидаться около 20 лет, но это не были годы пассивного ожидания. Можно без всякого преувеличения сказать, что эйнштейновская модель вынесла на своих плечах весь первый период развития квантовых идей.

Прямая экспериментальная регистрация квантов света (более широко — квантов электромагнитного поля!) произошла в процессе исследования рентгеновских лучей. Как мы помним, примерно к 1912 году была доказана их электромагнитная природа. Однако при рас-



сеянии веществом рентгеновские лучи обнаруживали несколько странное поведение — часть рассеянных волн имела меньшую частоту. Эффект уменьшения частоты (или увеличения длины волны) был найден уже в 1913 году, и это был еще один факт, противоречащий классической электродинамике, не допускавшей, чтобы рассеяние волн сопровождалось такого рода изменениями. Через 9 лет молодой американский физик А. Комптон, тщательно исследовавший странное явление, пришел к выводу, что наблюдаемое уменьшение частоты связано с потерей импульса световыми квантами в результате соударений с электронами. Тем самым было доказано, что квант, как и любая другая частица, несет и энергию и импульс.

А. Комптон придумал для новых частиц отличное название — фотоны. С тех пор сдвиг длины волны рассеянного излучения именуется «эффектом Комптона».

Не менее интересна и история предоткрытия, а потом и экспериментального обнаружения третьего патриарха микромира — протона. В этой истории удивительно сильно сконцентрированы все надежды и достижения первопроходцев физики элементарных частиц.

Четкая формулировка исходной гипотезы о существовании некой частицы, несущей положительный электрический заряд, равный по абсолютной величине заряду электрона, но имеющей примерно в 1840 раз большую, чем у электрона, массу, принадлежит Э. Резерфорду. Она логически неизбежно вытекала из результатов работ по классификации известных атомных ядер. Все они выстраивались в последовательную цепочку по величине электрического заряда, который, в свою очередь, соответствовал порядковому номеру вещества в периодической системе элементов Д. Менделеева. Таким образом, ядро атома водорода, несущее единичный положительный заряд, должно было представлять собой элементарный объект, который одновременно играл роль строительного кирпичика для остальных ядер.

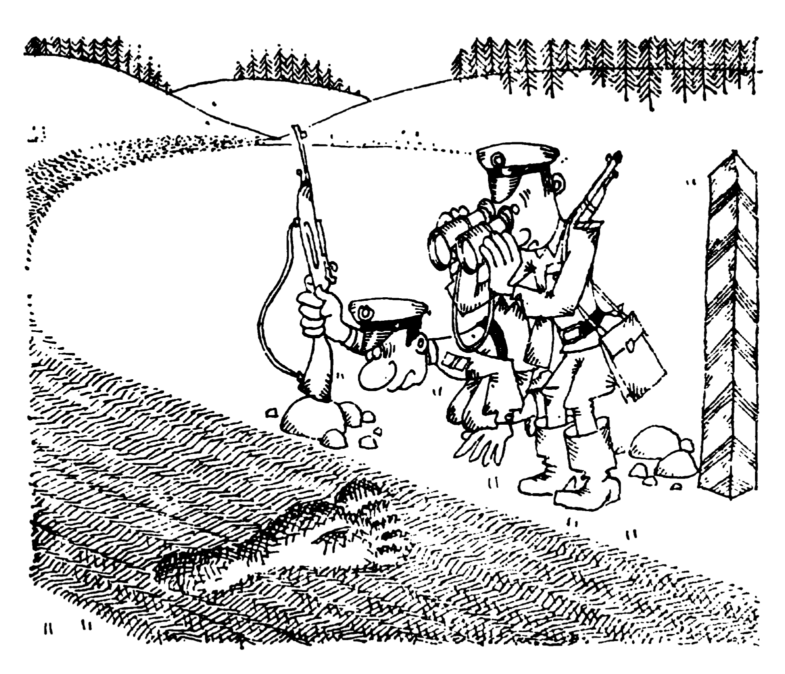
Гипотеза Э. Резерфорда была настолько естественна и остальные параметры этой, названной протоном, частицы были вычислены до того надежно, что, пожалуй, ни у кого и не должно было возникнуть серьезных сомнений в ее существовании. Прямая же экспериментальная регистрация новой частицы состоялась только через несколько лет, в 1925 году.

Вскоре после открытия атомных ядер Э. Резерфорд поставил перед своей лабораторией труднейшую задачу — вызвать искусственную радиоактивность, обстреливая ядра альфа-частицами.

Действительно, если ядра способны к самопроизвольным превращениям, в результате которых происходит испускание, например, тех же альфа-частиц (так называемая естественная радиоактивность), то почему нельзя добиться аналогичных превращений искусственно, с помощью подобающих «мер внушения»?

Сам Э. Резерфорд предпринял, начиная с 1919 года, ряд попыток расщепить ядро; но полученные им данные не были достаточно убедительны. Тогда эстафету учителя принял представитель старой резерфордовской гвардии П. Блэккет.

Изучая рассеяние альфа-частиц на азоте, П. Блэккет блестяще справился с предложенной проблемой. Но новая элементарная частица не очень-то стремилась к саморекламе. В процессе ее поиска ему пришлось пересмотреть более 20 тысяч фотографий, где было зарегистрировано около полумиллиона траекторий одних толь-



ко альфа-частиц. И лишь среди них он сумел отыскать восемь редких событий: ядра азота захватывали альфа-частицу и превращались в ядра кислорода, испуская протон!

Так на физическую сцену вышел главный герой современной физики высоких энергий — протон. У него пока почти все впереди. Он еще доставит десятки бессонных ночей экспериментаторам, теоретикам, конструкторам уникальных приборов. Одно упоминание о нем будет приводить в трепет правительственные комиссии по финансированию науки. И в довершение всего он окажется на редкость «неблагодарным» — первым из представителей микромира подаст глубоко обоснованный протест по поводу столь привычного и безобидного прилагательного «элементарный». Но все это впереди, а пока нам необходимо в корне пресечь одно назревающее недоразумение.

Только что было сказано, что протон обнаружился при просмотре фотографий. А можно ли сделать фотопортрет элементарного объекта, размеры которого примерно в сто тысяч раз меньше атома? Любой начинающий фотолюбитель скажет, что этого не может быть. И окажется вполне прав, хотя... портреты протона все-таки существуют.

Фотопленка фиксирует, конечно же, не самих героев микромира, а следы, которые они оставляют в том или ином веществе, и которые, как правило, видны даже невооруженным глазом. Но наши герои — великие конспираторы: они никогда не оставляют следов где попало. Поэтому вещество, в котором мы хотим зафиксировать движение микрочастиц, должно быть приведено в особое состояние и реагировать на появление долгожданных гостей так, чтобы глаза или фотоаппарат могли уловить эту реакцию. В общем, это напоминает устройство специальных полос разрыхленной земли вдоль государственных границ — любой пешеход-нарушитель поневоле должен оставить свою «визитную карточку».

А теперь нам снова придется взглянуть на события достославного 1897 года. Взглянуть для того, чтобы исправить небольшую неточность и сказать: это не просто дата рождения электрона, а дважды юбилейный год, ибо тогда был создан прибор, который сами же физики называли «уникальным окном в ядерный мир».

Итак, в 1897 году двадцативосьмилетний физик

Ч. Вильсон, исследовавший проблему конденсации облаков из водяного пара, открыл интересный эффект. Известно, что в воздухе, перенасыщенном водяными парами, мельчайшие частички пыли становятся центрами конденсации влаги. Из огромного количества таких центров формируются симпатичные белые облачка и устрашающие «свинцовые» тучи. Ч. Вильсон обнаружил, что после достаточно полной очистки воздуха роль пылинок начинают играть заряженные частицы, например, ионы, вокруг которых охотно образуются капельки воды. Отсюда немедленно следовала идея прибора — регистратора невидимок.

В сосуде, снабженном поршнем, создавалось насыщение водяного пара, затем с помощью поршня резко менялось давление и достигался нужный уровень перенасыщения, а в такой ситуации попадавшие внутрь заряженные частицы оставляли следы — полоски тумана. Так родилась знаменитая «камера Вильсона». Вскоре она была использована для исследования характеристики электрона, сослужила добрую службу в выяснении природы радиоактивности и, наконец, помогла П. Блэкkету открыть протон.

Физика элементарных частиц родилась в процессе исследования всевозможных загадочных излучений. Поиски разгадок, несомненно, принесли замечательные плоды, но эти плоды не имели даже привкуса окончательной ясности и не сулили вкусившему их долгожданной радости. Катодные лучи — поток электронов? Очень хорошо! А почему электрон несет заряд, составляющий $1{,}6021892 \cdot 10^{-19}$ кулона? Почему электрический заряд протона по абсолютной величине с поразительной точностью совпадает с зарядом электрона, тогда как масса протона в 1836,15152 раза больше?

И конечно, существует множество других трудных вопросов, появившихся вместе с первыми частицами и до сих пор не имеющих ответа.

ГЛАВА ВТОРАЯ,

УВЛЕКАЮЩАЯ НАС В НЕБОЛЬШОЕ ПУТЕШЕСТВИЕ ПО ВРЕМЕНАМ И ТЕОРИЯМ



Вероятно, время такое же круглое, как наша Земля. Иначе почему человек, направляясь в будущее, рано или поздно оказывается в прошлом.

Ф. Кривин

КОЕ-ЧТО О ПУТЕШЕСТВИЯХ ВО ВРЕМЕНИ

Человек обречен на определенные трудности — он вынужден устраивать свою жизнь сразу в трех временах. Каждый шаг, каждое решение в настоящем неразрывно связаны с нашим предыдущим поведением, и не только с ним, но и с опытом предшествующих поколений. В то же время большинство наших решений зависит от планов на будущее, от того, как мы представляем себе свое положение в завтрашнем дне.

Например, мечтая стать физиком, школьник стремится поступить на физический факультет университета и, естественно, уделяет любимой науке особое внимание. Ясно, что особые отношения с физикой могут формироваться под действием многих факторов, но, как правило, основную роль играет хорошее знакомство с доброкачественной научно-популярной литературой. Кого не способны привести в изумление увлекательные рассказы о цепочке открытий, изменяющих самые глубокие представления о мироздании! А приложения абстрактных

физических теорий, ведущие к радикальной перестройке современной техники и технологии!

Конечно, одного изумления мало. Можно преклоняться перед красотой физических идей и всю жизнь писать стихи или искать нефть. Тут вступают в игру и многие другие факторы. Во-первых, изумление должно быть настолько сильным, чтобы превратиться в неукротимое желание принять участие в дальнейшей судьбе данной науки. Во-вторых, неплохо иметь способности к соответствующим занятиям. И наконец, необходимо огромное упорство. Ведь сколько раз юношеское воображение, густо усеянное туманными образами фотонных звездолетов, наталкивалось на трудные пороги монотоннейших вычислений и противных, как зубная боль, капризов измерительной аппаратуры!

Так что поведение нашего школьника довольно сложным образом зависит от того, как он представляет себе историю физики, современное положение и перспективы работы в этой области, в частности, перспективы собственной деятельности в будущем. Вот и приходится путешествовать во времени, отвлекаясь от сегодняшних важных проблем. Без таких путешествий жизнь стала бы сплошным потоком серой текучки, а все горизонты стянулись бы в бессмысленную точку. И все же, в чем секрет увлекательных экскурсий?

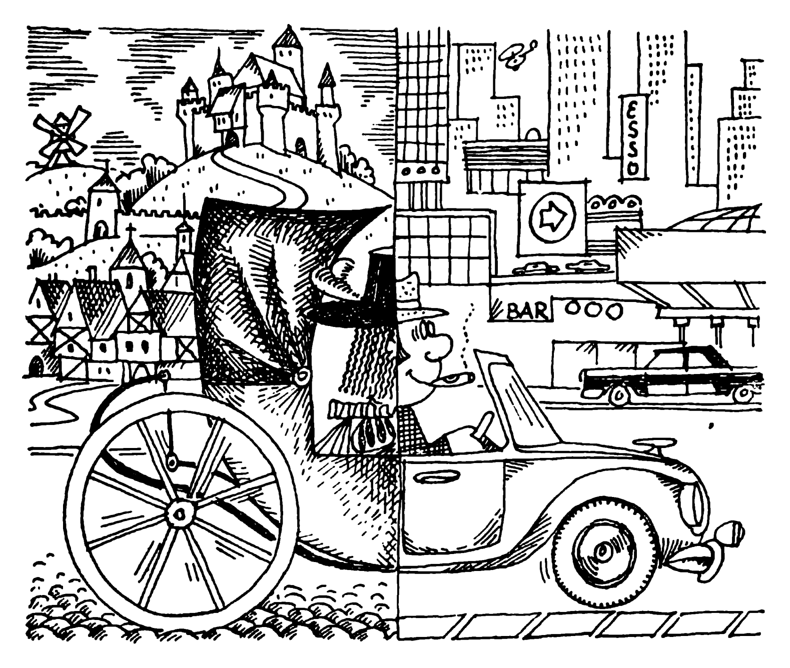
В небольшом романе «Меж двух времен» американский писатель Дж. Финней придумал следующий литературный ход. Его герой то переходит в прошлое лет на 60 назад, то снова попадает в наши дни. Достигается это довольно простым способом. Героя поселяют в старинной квартире, окружают старинными вещами, даже вид из окон соответствует тому времени, в которое он должен попасть. Постепенно он настолько в это вживается, что в один прекрасный день выходит на прогулку и... застает город в том состоянии, в котором он находился многие десятилетия тому назад. Впоследствии молодой человек начинает устраивать подобные удивительные трансформации довольно регулярно и успевает совершить (вместе с очаровательной героиней) все необходимые подвиги.

Роман Дж. Финнея пронизан ностальгией по безвозвратно ушедшим «старым добрым временам». В конце концов его герои предпочитают насовсем остаться в прошлом. Для нас же важно здесь несколько иное.

Основная идея автора глубоко научна — время для человека не отсчитывается по каким-то абсолютным часам, а метится по происходящим событиям. И в наши дни не так уж сложно попасть в такие места, где царствует техника тысячелетней давности. Представитель племени, живущего по такому укладу, оказавшись внезапно в стеклянных чертогах современного аэропорта, перенесется в собственное будущее, на многие века вперед.

Отсутствие абсолютных часов приводит и к интересному обратному эффекту. Оказывается, что прежде, чем как-то оценить давно минувшие или грядущие события, необходимо проделать большую и весьма тонкую работу: реставрировать, а иногда и воссоздать заново отдельные детали, постараться правильно разглядеть целостную картину прошлого или грядущего. Последнее особенно нелегко. Ведь современный исследователь всегда смотрит на отдаленные явления сквозь призму представлений своего века, а то и десятилетия. В этом смысле понимание прошлого и будущего сильно зависит от уровня, достигнутого в настоящем.

Еще каких-нибудь сто лет назад ученые не имели



ни гигантских радиотелескопов, ни радиоактивных методов анализа... Не было, иными словами, даже способа датировки таких важных для естественной истории событий, как образование наблюдаемого участка вселенной или нашей планеты. Не расшифровывались многие древние письмена, не были обнаружены важнейшие звенья великой эволюционной цепочки «обезьяна — человек»... Так что немало значительных событий пребывало еще вне научной картины мира, искажая тем самым в большей или меньшей степени представление о прошлом.

Конечно, недостающие элементы вводились теоретически, и в таких гипотезах, как в капле воды, концентрировалось мировосприятие ученых того времени. Скажем, сама постановка проблемы возникновения вселенной считалась антинаучной, а попытки обсуждения пресекались как бесполезные богословские сказочки. Еще отчетливей роль «призмы своего века» видна в прогнозах на будущее. Во многих случаях эти прогнозы кажутся изрядным нагромождением нелепостей — летающие аппараты с огромными паровыми двигателями, телеграфный кабель между Землей и Луной, бурение скважин с помощью гигантских оптических линз... Но не будем забывать, что наряду со всем этим предсказывались полеты к другим планетам и проникновение в тайны атомов! И кроме того, задумаемся: не улыбнутся ли через сто лет наши дорогие потомки по поводу большинства наших перспективных проектов?..

Итак, для путешествия в далекое (а потом и более близкое) прошлое науки об элементарных частицах нам придется учитывать довольно сложное взаимодействие времен. Конечно, этот учет не будет вестись «с бухгалтерской точностью», очень многое будет сознательно упрощаться. Но упрощения не грех, если они не слишком сильно искажают истинное положение дел и оставляют простор для более глубоких размышлений.

МАРШРУТ № 1. НЕУЛОВИМЫЕ АТОМЫ

Физика элементарных частиц действительно очень молодая наука, но она имеет чрезвычайно древние корни, которые постепенно, в течение более двух тысячелетий, оплетали научные представления о структуре ве-

щества. Как говорилось, непосредственный прорыв в мир частиц произошел 80 лет назад, когда Дж. Дж. Томсон объявил об открытии электрона. Однако значение его открытия намного выходит за рамки блестящего финала исследований природы катодных лучей.

Судя по имеющимся источникам, идеи о существовании «первокирпичиков» материи сформировались в Древней Греции. Первые формы атомистической гипотезы встречаются, по-видимому, у Фалеса Милетского, чья плодотворная и долгая (почти столетняя!) жизнь примерно поровну разделилась между VII и VI веками до нашей эры. Но настоящий расцвет античной атомистики относится к более позднему периоду и связан с именами Левкиппа и Демокрита. Именно последнему принадлежит очень важная идея о хаотическом движении атомов в пустоте как истинной причине изменчивости наблюдаемых вещей.

Ход рассуждений Демокрита и большинства других атомистов древности был довольно прозрачен и состоял приблизительно в следующем. Обычные куски вещества можно делить на множество более или менее мелких частей, причем каждая часть сохраняет ряд свойств целого, например, вода, разлитая из большого кувшина по малым сосудам, остается водой. Существуют ли наименьшие порции, сохраняющие основное свойство вещества «быть именно данным веществом» и не способные к дальнейшему делению? Если существуют, то любой объект можно рассматривать как огромную совокупность атомов (в буквальном переводе — неделимых), связанных между собой определенными силами.

В свете современных представлений Демокритов атом выглядит весьма наивно — нечто вроде очень маленького твердого шарика с крючочками, с помощью которых можно цеплять другие атомы. Наивность эта вполне оправдана, ведь в те времена люди не имели понятия ни о каких физических силах, кроме механического воздействия. Зато в последнем разбирались не так уж плохо — были разработаны многие механизмы для вертикального и горизонтального передвижения тяжестей, откуда и заимствовались аналогии. Теперь мы хорошо знаем, что за структуру атомов и молекул отвечают электромагнитные силы, но тогда об электричестве известно было крайне мало — ходили слухи о каком-то таинственном свойстве янтаря.

В общем, античные атомы можно считать древнейшими предками современных элементарных частиц. Двадцатипятивековое «генеалогическое древо» — вполне достойное украшение дворца самой красивой дамы физического королевства. И все-таки трудно отделаться от впечатления, что ее каприз сыграл в появлении этого украшения не последнюю роль. Неужели предоткрытие элементарных частиц произошло так давно, когда мир еще ожидал Аристотеля, чтобы подвести итоги самого первого периода развития физики и вообще ввести в обиход ученых это замечательное слово — «физика»?

Что ж, удивление это в значительной степени справедливо. И мы попробуем убедиться в истинной глубине поставленного вопроса с помощью такого мысленного эксперимента. Пусть один из участников нашего воображаемого путешествия во времени решится на героический поступок — остаться среди современников Демокрита и объяснить им, что такое настоящие атомы и элементарные частицы. По условию эксперимента этот Просветитель (так мы будем условно обозначать смелого участника) должен использовать для своей деятельности только те приборы и материалы, которые он найдет в древнем мире, но может опираться на любые известные нам теоретические результаты и исторические факты. Что произойдет?

Наиболее вероятная схема развития событий выглядела бы так.

Просветитель может без особого труда отыскать несколько крупнейших философов ближайшего греческого полиса (так назывались сравнительно большие города) и даже собрать их вместе. Ученые мужи с уважением и вниманием заслушают сладкозвучные речи иноземца, с любопытством станут взирать на странные картинки, которые Просветитель рисует на влажном песке.

Его выслушают до конца, ему зададут множество вопросов. Где он видел удивительные светящиеся сосуды? Какую форму и цвет имеют эти самые янтарные частички («электрон» по-гречески — янтарь)? Горячие они или холодные? И наконец, последует главный вопрос: можно ли все-таки на них взглянуть или как-то их пощупать?.. В общем, слова словами, а где же, уважаемый иноземец, твои истинные атомы? Просветитель, конечно, пообещает в ближайшее время показать почтенному собранию опыты, которые покажутся абсолют-

но доказательными и т. д. и т. п. И, как говорится, на том, ко всеобщему удовольствию, и расстанутся.

Пройдет совсем немного времени, и Просветитель с ужасом поймет, что никаких настоящих демонстраций провести ему так и не удастся. Повторить известные ему эксперименты по установлению природы, например, тех же катодных лучей вроде бы и несложно. Да вот незадача — надо сначала открыть рецепт стекла, научиться стеклодувному делу, изобрести насосы для создания хорошего вакуума, придумать схему работы с электрическим и магнитным полями. Даже минимальный вариант — показать какую-нибудь далеко не элементарную, а просто не видимую невооруженным взглядом частичку — и то не проходит: где взять оптические линзы для микроскопа? Короче говоря, смелый Просветитель на собственном опыте убедится в колоссальной разнице технического уровня двух эпох. А если бы мы сделали условия мысленного эксперимента еще более реалистичными и запретили бы Просветителю пользоваться всеми знаниями о промежуточных этапах теории? Ему пришлось бы заново открывать законы механики, электричества и магнетизма, физики газов, оптики — практически все те законы, на которые опирались первооткрыватели элементарных частиц в процессе постановки экспериментов, создания необходимых приборов и интерпретации результатов.

А теперь нетрудно сообразить, что во время второй встречи с собранием мудрейших мужей Просветитель вынужден был бы ограничиться лишь немногими доступными ему средствами, и вряд ли его сведения добавили бы что-нибудь существенное к Демокритовым аргументам в пользу атомов. Не исключено, что настоящее имя Просветителя попало бы впоследствии на первые страницы учебников по истории физики как имя выдающегося проповедника ранних атомистических гипотез. Но разве этого он добивался! Однако для нас итоги мысленного эксперимента вполне удовлетворительны, а истолковать их можно следующим образом.

Никакого предоткрытия двадцатипятивековой давности, разумеется, не было. Атомистические гипотезы тех времен не были, и что еще важнее, не могли быть включены в существовавшую тогда систему естественнонаучного знания. Выражаясь словами современных науковедов, научно-технический потенциал античного мира не

позволял совершить такое включение. Поэтому ни Левкипп, ни Демокрит, ни другие античные атомисты не предсказывали и не могли предсказать существования тех атомов и элементарных частиц, которые были открыты в процессе развития науки; в противном случае мы вынуждены были бы приписать им собственные мысли, нарушить правила пользования «призмой времен».

И все-таки факт остается фактом — атомы присутствовали в картине мира древних греков. В чем же здесь дело, нет ли противоречия? Чтобы ответить на этот вопрос, следует обратить внимание вот на какое обстоятельство.

В античной науке была чрезвычайно ярко выражена своеобразная тенденция синтезировать знания, предельно широко охватывать мир единой совокупностью представлений. Конечно, во многих случаях не хватало конкретных данных, не были еще установлены те тысячи и тысячи частных закономерностей, которые по современным представлениям лежат в фундаменте научной картины мира. И все же, несмотря на это, всякий маломальски уважающий себя ученый тех времен, можно



сказать, стеснялся не ответить на какой-либо вопрос о природе явлений. Научные традиции заставляли мыслителей античности выстраивать грандиозные умозрительные модели мироздания, объясняя все и вся единым и непротиворечивым образом. Ясно, что в такой ситуации нехватка конкретных знаний по тем или иным вопросам должна была заменяться изрядным количеством правдоподобных домыслов. Очень часто красота и общность умозрительных построений играли в дискуссиях гораздо большую роль, нежели скрупулезное сопоставление с опытными данными. Наука, как знание, пропущенное сквозь строжайшие экспериментальные фильтры, наука в ее современном понимании была еще впереди.

Естественнонаучные знания древних времен, не только добытые опытным путем, но и домысленные, входили в состав прародительницы всех современных наук — философии. Именно философия и пыталась воссоздать единую картину мира; и в этой картине нередко причудливым (для нас!) образом переплетались собственно научные данные, элементы искусства, логические упражнения и практические рецепты. Однако создание пусть не полностью достоверной, но единой копилки разнообразного опыта было совершенно необходимым делом — делом, которое стало одним из важнейших буквально с первых мгновений существования рода человеческого.

Человек, в биологическом отношении такое же примерно существо, как и мы с вами, появился около миллиона лет назад. Появился и стал создавать общее представление об окружающем мире, о своих собратьях, о себе самом. Любое явление, имело оно правильное объяснение или нет, должно было войти в «научную картину» нашего далекого пращура. Ему было ничуть не легче от того, что, скажем, голодный тигр сидит в засаде, повинуясь рефлекторно закрепленному инстинкту охоты, а боевой клич громадной обезьяны связан с зачатками второй сигнальной системы... И, не дожидаясь строгих научных заключений, в картину мира первочеловека входило представление о таинственной, всюду подстерегающей его злой силе — безусловно наивное, но неоценимо полезное представление, заставляющее «держать ухо востро». Ведь за каждую неверно истолкованную частность приходилось, как правило, платить самой дорогой ценой — жизнью.

Таковы, в общих чертах, глубокие корни нашей тяги

к намного опережающим время сверхобобщениям. Атомы древних греков — один из замечательных примеров на эту тему. Они являются своеобразными логическими конструкциями, с помощью которых античные философы достраивали свою картину мира, в частности, докомплектовывали свои представления о структуре вещества.

МАРШРУТ № 2. КВАНТОВАННЫЙ МИР

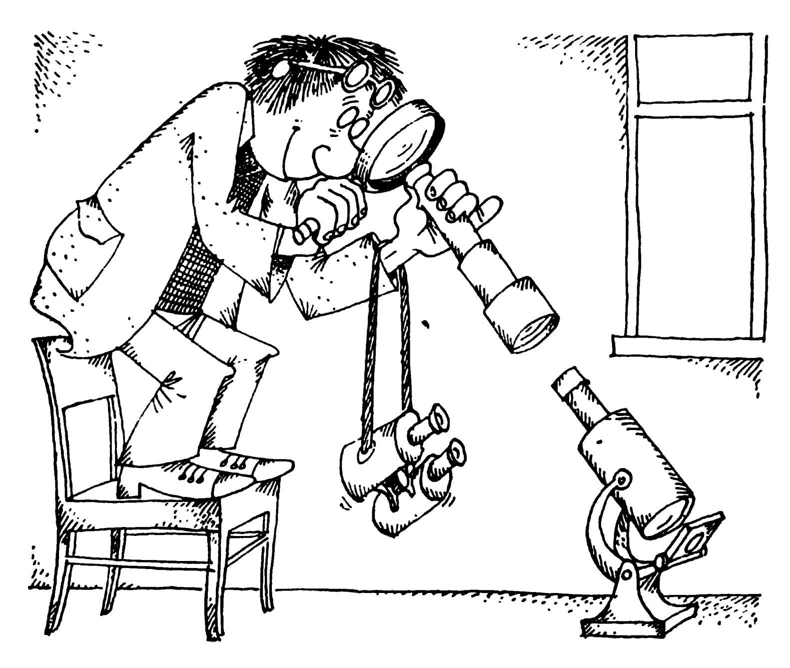
Обозначим сразу же цель нашего второго путешествия. В начале 20-х годов французский физик Луи де Бройль сделал удивительное предсказание — любые объекты должны вести себя подобно волне, причем чем меньше масса объекта, тем легче проявляются его волновые свойства. Отсюда, в частности, следовало, что уже доступными к тому времени средствами экспериментаторы могут зарегистрировать волновую картину рассеяния электронов, самых легких среди всех частиц, обладающих массой.

Итак, менее чем через три десятилетия после, казалось бы, четкого доказательства корпускулярной природы элементарных электрических зарядов появилась идея о том, что электроны должны вести себя как типичные волны, наподобие электромагнитных. Более того, гипотеза Л. де Бройля оказалась самым настоящим предоткрытием — она сыграла исключительно важную роль в развитии теории и через несколько лет получила блестящее экспериментальное подтверждение.

Как представляли себе физики элементарную частицу, например, электрон, в начале нашего века? Считалось, что это шарик из какого-то необычного насыщенного электричеством вещества, имеющий размер порядка 10^{-13} сантиметра. Конечно, экспериментаторы того времени не имели возможности видеть столь малые расстояния непосредственно, однако указанное значение размера могло быть вычислено на основе классической электродинамики, и его назвали «классическим радиусом» электрона. Попытки исследовать поведение вещества в областях пространства с меньшими размерами наталкивались на непреодолимые трудности. Поэтому уже тогда многие физики считали «классический радиус» своеобразным барьером, за которым должны вступить в игру совершенно новые законы природы.

Такая наглядная (отвлекаясь, разумеется, от невообразимо малых масштабов!) модель электрона представлялась неудовлетворительной опять-таки по весьма наглядным причинам. Неприятности начинались уже в тот момент, когда кто-нибудь пытался продвинуться хотя бы на шаг дальше и ответить на вопрос: «Каковы же свойства вещества, из которого состоит элементарный электрический заряд?»

Предположим, например, что электрон представляет собой упругий шарик, способный сжиматься или расширяться, — вообще, деформироваться под действием внешних сил; нечто вроде теннисного мячика, уменьшенного в тысячи миллиардов раз! Но в таком случае весь опыт развития физики подсказывает, что само «электронное вещество» должно обладать какой-то внутренней структурой. Действительно, откуда берутся замечательные упругие свойства того же самого теннисного мячика? В тот момент, когда он ударяется, например, о землю, молекулы образующего его вещества испытывают некоторую деформацию, но стремятся немедленно возвратиться к исходному состоянию, и мяч резко отскакивает.



Иными словами, упругость связана с определенной молекулярной структурой — взаимным расположением молекул — и величиной силы, связывающей эти микрообъекты между собой. Если великий И. Ньютон мог исследовать законы соударения упругих бильярдных шаров, не углубляясь в проблему их атомно-молекулярного строения, и выводить отсюда важные законы механики, то в начале нашего века такая точка зрения уже не могла удовлетворить исследователей. Тем более если речь шла об электроне! Его упругие свойства, несомненно, требовали объяснения, то есть в конечном счете нужны были дополнительные предположения о его внутренней структуре. Таким образом, представление об упругом электроне-шарике неизбежно вело к идеям о существовании каких-то более мелких частиц, из которых построено «электронное вещество». Но ведь и те, более мелкие частицы будут построены из еще более мелких частиц и т. д. и т. п. И нет ничего скучнее такой бесконечной повторяемости одного и того же приема постижения реальности!

А что, если одним махом покончить с этой повторяемостью уже на уровне электрона? Что, если объявить его истинно элементарной частицей, тем самым «атомом» в буквальном смысле слова, как его понимали древние греки?

Посмотрим, какие проблемы возникнут в этом случае.

С точки зрения физики можно вообразить идеальный «неделимый» объект, не подверженный никаким деформациям. Он известен под названием «абсолютно твердого тела». Такое представление довольно полезно в механике, где изучается движение больших тел, но, разумеется, это типичное упрощение, пригодное для определенного, ограниченного круга задач. В реальное существование тел, которые никаким воздействием нельзя ни растянуть, ни сжать, ни расщепить на части, трудно поверить, — попросту говоря, науке неизвестны такие примеры. Но отсутствие примера — еще не достаточный аргумент против «абсолютно твердого» электрона. А вдруг именно электрон и представляет собой первый случай диковинного объекта?

Однако и в таком варианте мы сталкиваемся с серьезными затруднениями. В физике хорошо известен такой закон: чем тверже тело, тем быстрее в нем распростра-

няется звук. В воде — намного быстрей, чем в воздухе, в металле — намного быстрей, чем в воде и так далее... В конце концов, получается так, что в «абсолютно твердом теле» звук должен распространяться с бесконечной скоростью. Таким образом, звуковой сигнал проходил бы сквозь «абсолютно твердый» электрон-шарик мгновенно. Этот воображаемый факт не нарушает никаких правил обычной механики от Ньютона, но находится в непримиримом противоречии с электродинамикой, основанной на уравнениях Максвелла.

Последняя, казалось бы, довольно абстрактная проблема послужила отправной точкой для второй уже упомянутой статьи А. Эйнштейна в 1905 году. А. Эйнштейн предположил, что никакое движение или взаимодействие — вообще, несущий информацию сигнал — не могут распространяться быстрее света в пустоте. Это ограничение потребовало серьезного пересмотра основ механики, а впоследствии и физики в целом. Предположение А. Эйнштейна стало одним из краеугольных камней так называемой специальной теории относительности — одного из красивейших достижений научной мысли XX века. Механика частиц, построенная на основе теории относительности, стала называться релятивистской. Важнейшим ее достоинством как раз и оказалось хорошее согласование с электродинамикой.

Не останавливаясь на обосновании теории относительности, мы будем использовать два важных факта, следующих из нее. С первым мы уже знакомы — это ограничение на скорость распространения любых сигналов: она не может превышать скорость распространения света в пустоте. Второй факт состоит в том, что масса тела, движущегося по законам теории относительности, должна возрастать по мере того, как скорость движения тела приближается к предельной, то есть к скорости света. Поэтому частица, обладающая массой, практически никогда не может достичь предельной скорости, в этом случае она обладала бы бесконечно большой массой.

Итак, гипотеза «абсолютно твердого» электрона вступила в конфликт с релятивистской механикой. Сквозь шарик размером порядка 10^{-13} сантиметра ни один сигнал не может проходить быстрее, чем за время порядка 10^{-23} секунды. Это чрезвычайно малый промежуток времени, но он не равен нулю! Поэтому мы не

имеем права говорить об «абсолютной твердости» электронного вещества — оно поневоле должно обладать некоторой упругостью. Но, как мы помним, с упругим электроном-шариком тоже возникают немалые проблемы — необходимо объяснить природу упругого материала, из которого сделан электрон...

До сих пор мы обсуждали причины неудовлетворительности классической теории электрона с позиций классических же представлений. Старая концепция оказалась внутренне противоречивой, и появление теории относительности лишь подчеркнуло ее трудности. Многие физики того времени все еще питали надежды на светлое будущее модели электрона-шарика, полагая, что новые гипотезы о природе образующего микрочастицу вещества помогут спасти положение. Между тем эта модель уже завершала свой «круг почета», чтобы навсегда покинуть арену главных научных событий и занять достойное место в архиве замечательных физических теорий. А на смену ей выходили новые представления и законы квантовой физики...

В 1913 году датский физик Н. Бор предложил новую теорию атома. В ней на долю электрона выпала тяжкая судьба главного ниспровергателя обычных понятий о движении.

Н. Бор исходил из резерфордовских представлений о структуре атомов. Как вы помните, Э. Резерфорд пришел к заключению о планетарном строении атома — вокруг центрального ядра должны каким-то образом вращаться электроны. Каким-то? Вот именно, каким? На этот вопрос и попытался ответить молодой датский физик.

Дело в том, что аналогия между планетной системой и атомом хороша лишь до определенного предела. Электроны, как известно, несут электрические заряды и, двигаясь вокруг сильно заряженного ядра по круговым или почти круговым орбитам, неизбежно имеют некоторое ускорение (ускорение равно нулю только в случае прямолинейного и равномерного движения!). А ускоряемый заряд имеет «неприятное» свойство — он обязательно излучает электромагнитные волны. Поскольку волны обязательно уносят какую-то энергию, электрон ее должен терять — ведь полная энергия обязательно сохраняется! Но рано или поздно электрон потеряет всю свою энергию, как говорится, высветится, и непременно упа-

дет на ядро. Самое любопытное состоит в том, что произойти это должно чрезвычайно быстро — всеобщая катастрофическая вспышка, и никаких атомов! Необычайно унылая картина предстала бы перед нашим взором: нет привычного нам вещества, не говоря уж о живых существах, а следовательно, и наблюдать эту противную ситуацию вроде бы некому. Но ведь и обычное вещество и, наконец, мы с вами существуем. Где же противоречие?

Чтобы все-таки согласовать резерфордовскую структуру атомов с бесспорным фактом существования столь милой нашему сердцу атомно-молекулярной вселенной, Н. Бор пошел на героический шаг — он просто запретил электронам непрерывно излучать электромагнитные волны. Он предположил, что электроны должны находиться на некоторых строго определенных орбитах и, двигаясь по этим орбитам, никогда не теряют энергию. Излучение же происходит тогда и только тогда, когда электрону «вздумается» перескочить с одной орбиты на другую.

Но каждая строго определенная орбита соответствует и строго определенному значению энергии электрона. Поэтому при перескоке с одной орбиты на другую электрон может излучить или поглотить тоже строго определенную порцию энергии. Эта порция, очевидно, равна разности между начальным и конечным значениями энергии, которые электрон должен иметь на соответствующих орбитах.

Таким образом, электрон поглощает или теряет энергию только порциями, или квантами. Но ведь, скажем, потери происходят из-за излучения электромагнитного поля! Значит, все будет вполне «увязано», если предположить, что и само электромагнитное излучение происходит только определенными порциями, то есть принять уже знакомую нам эйнштейновскую гипотезу об излучении как потоке порций света, световых квантов-фотонов. Именно так и поступил Н. Бор.

Далее, он использовал эйнштейновскую связь между энергией фотона и частотой и пришел к выводу, что частоты фотонов, которые способен излучать атом, имеют также строго определенные значения. Этот результат превосходно соответствовал многолетним наблюдениям экспериментаторов, изучавших спектры излучения и поглощения различных атомов, и указывал на удиви-

тельную закономерность появления полос, соответствующих некоторым строго определенным значениям частоты.

Однако успех боровской модели в объяснении экспериментальных данных был куплен дорогой ценой. Но такова уж, вероятно, судьба всех великих идей — они редко появляются только для того, чтобы просто заделать мелкие огрехи на поле существующей теории. Гораздо чаще старая теория вообще остается без пышных одежд и живет лишь до тех пор, пока кто-нибудь не шепнет знаменитые слова: «А король-то голый».

Запрещая непрерывное излучение, Н. Бор фактически запретил и непрерывное движение электрона. И именно поэтому его идеи вызвали целый шквал дискуссий. Еще бы! Ведь гениальный датчанин поставил под удар «святая святых» классической физики — представление о непрерывном движении. Вместо ясных траекторий в пространстве появились какие-то скачки между различными орбитами, кое-кто уже и непрочь был пофантазировать: а вдруг электрон вообще выскакивает из обычного пространства и времени...



Теория Н. Бора бросала смелый вызов всей физической теории в целом. На стороне квантовой модели атома были только экспериментальные данные, которые она объясняла, да, пожалуй, единственная теоретическая модель световых квантов. Сам же А. Эйнштейн, заслуживший к тому времени славу главного «крушителя основ», оказался в числе наиболее активных оппонентов Н. Бора. Не столь уже редкий случай, когда концепция и ее творец становятся по разные стороны баррикад...

В конечном счете дискуссии показали, что теория Н. Бора стоит вне конкуренции в описании атомных экспериментов, но практически ни один из крупнейших теоретиков не был удовлетворен обоснованием квантовой картины.

Первый фундамент под квантовую модель атома как раз и был подведен в работах тридцатилетнего Л. де Бройля, выполненных в 1923 году и включенных в его докторскую диссертацию. История вряд ли сумеет назвать еще одного столь же дерзкого претендента на ученую степень. Достаточно сказать, что А. Эйнштейн — едва ли не единственный физик, сразу почувствовавший преобразующую силу дебройлевских идей, — рекомендовал прочесть диссертацию М. Борну, охарактеризовав ее как «солидно написанный труд сумасшедшего»!

Гипотеза Л. де Бройля интересна и поучительна и в ином отношении. Она представляет собой удивительно ясный пример плодотворнейшего использования аналогий. Молодой исследователь исходил из того, что строго определенные значения частот получаются в боровской модели слишком искусственным путем. К обычной механике движения тел по орбитам добавляется специальное правило «допустимых орбит», между которыми электроны могут совершать перескоки. А нельзя ли получить тот же самый результат более естественным способом?

Л. де Бройль начинает свое построение с очень интересного мысленного опыта. Давайте предположим, говорит он, что фотон, эйнштейновский квант электромагнитного поля, имеет чрезвычайно малую, но не нулевую массу. Обычно в теории считают, что это не так и масса фотона строго равна нулю. Но ведь ее можно сделать (мысленно!) настолько малой, что никаким известным экспериментам это не будет противоречить.

После этого Л. де Бройль напоминает о двойственной природе электромагнитного поля. Если масса фотона

настолько мала, что ее нельзя заметить в эксперименте, то, очевидно, нельзя и заметить какие-либо изменения и в известных волновых свойствах электромагнитного поля. Таким образом, делает вывод молодой физик, наличие у частицы массы не исключает в принципе и проявления ее волновых свойств.

Теперь Л. де Бройль делает чрезвычайно смелый и красивый шаг по устранению несправедливости (вероятно, все шаги в этом направлении смелые и красивые, но, увы, далеко не все они достигают цели). Почему, спрашивает он, в случае электромагнитного поля мы пользуемся двумя представлениями: волнами и частицами (фотонами!), а в случае электрона — только одним: частица, и все тут? Если дело только в массе электрона, то волновые явления наблюдать будет трудней, чем в случае электромагнитного поля, но все-таки их можно увидеть!

Итак, Л. де Бройль предсказал, что электрону необходимо сопоставить волну, причем длина волны должна быть обратно пропорциональна его импульсу. Это прежде всего привело к очень простому и естественному объяснению загадочного устройства боровского атома.

Как вы помните, Н. Бор «разрешил» электронам двигаться, ничего не излучая, лишь по некоторым, строго определенным орбитам. Но перед физиками встал мучительный вопрос: чем, собственно говоря, выделены именно такие «допустимые орбиты» среди любых других? Неужели, недоумевали теоретики, за боровскими правилами определения этих орбит не скрывается какое-то глубокое свойство электронов, ясный физический образ, который помог бы расшифровать столь необычные законы внутриатомного движения?

Что уж тут поделаешь! Ни в физике, ни в повседневной жизни люди не удовлетворяются сухими предписаниями типа: «то-то и то-то должно двигаться так-то и так-то». Всегда возникают вопросы: а почему именно так, а что будет, ежели по-другому?..

Возьмем совсем простой, казалось бы, пример — правила дорожного движения. На автострадах, на улицах наших городов развешаны многочисленные знаки, которые запрещают, указывают, предостерегают, предлагают... Их придумано очень много — ровно столько, сколько необходимо, чтобы сориентироваться на современных, перегруженных машинами дорогах. И трудно

выучить все эти знаки просто так, не вдумываясь в их смысл, не испытав их значения на практике, сидя за рулем. Установлено, что автолюбители, сознательно изучившие роль тех или иных знаков, гораздо реже попадают в аварии, чем те, которые восприняли науку о дорожном движении как скучную приправу к заветным водительским правам. И вот, скажем, перед водителями первого и второго типа возникает знак «Обгон воспрещен!».

Первый, несомненно, послушается, даже если ему придется плестись в хвосте у неторопливого перегруженного грузовика с прицепом. Он хорошо знает, что обгонять нельзя по той простой причине, что на данном участке дороги не хватит места для трех автомобилей, идущих рядом, а вероятностью появления встречной машины как раз в момент обгона не стоит пренебрегать. Второй водитель в такой же ситуации начнет лихорадочно соображать: «Эта дизельная вонючка вымотает мне все нервы... Только что я успешно совершил несколько обгонов, ширина дороги вроде бы не изменилась, инспектора нигде не видать... Была не была!» Проскочит он, может быть, разок-другой по принципу «была не была», а на третий — краткое сообщение ГАИ в вечерней газете, скромный венок от месткома... А ведь вдумайся он хоть раз в «физический смысл» запрета на обгон, ездить ему бы и ездить...

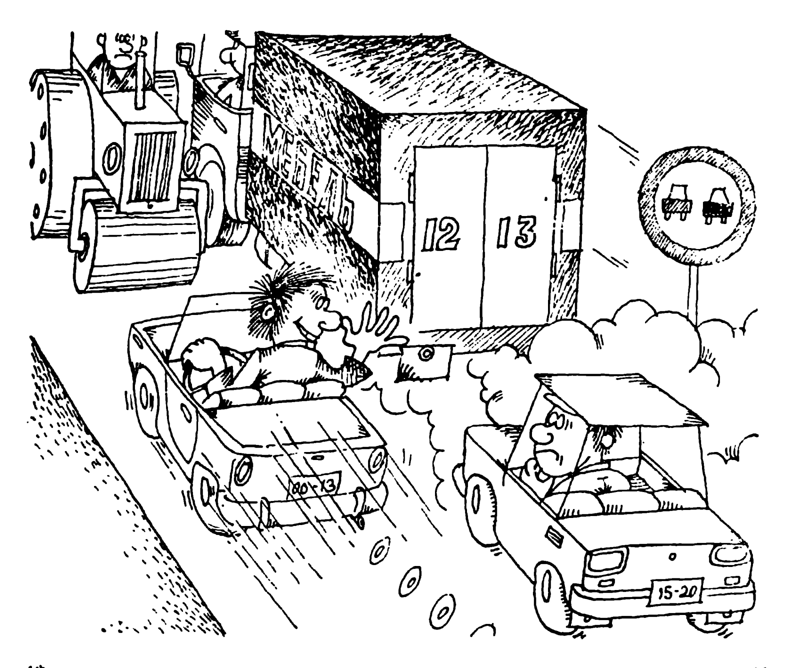
Имея в виду этот несколько грустный пример, перейдем к правилам внутриатомного движения электрона. Почему в них разрешено движение только по строго определенным боровским орбитам? Л. де Бройль ответил на этот вопрос следующим образом: вместе с электроном на орбите присутствует волна, и вот именно она может существовать только в некоторых строго определенных случаях.

Вот, оказывается, в чем суть дела! Будь электрон просто частицей, он мог бы носиться вокруг ядра на любом расстоянии. Но его неизбежно сопровождает волна, и ему приходится думать и о ее существовании. А волна, в свою очередь, «выбирает» только те орбиты, на которых она может уложиться целое число раз. Иными словами, отношение длины окружности, по которой бегает электрон, к длине сопровождающей его волны непременно должно быть целым числом. Очевидно, что орбиты, удовлетворяющие этому условию, окажутся вы-

деленными, а на всех остальных орбитах просто не хватает места для того, чтобы «электронная волна» бежала по замкнутой окружности, уложившись в ней целое число раз.

Исходя из таких соображений, Л. де Бройль сумел объяснить закономерности расположения электронных орбит в атоме и правила, по которым атомы излучают фотоны строго определенных частот. Это был огромный, но отнюдь не главный успех молодого исследователя. Из его гипотезы следовало, что волновые свойства электронов должны проявиться и вне атомов. В частности, электроны должны были рассеиваться на достаточно малых препятствиях, подобно электромагнитным волнам, в частности, свету, образуя дифракционную картину.

Дифракция — очень интересное явление. Его обнаружение явилось в свое время решающим аргументом в пользу волновой теории света. Еще древние греки догадывались, что свет распространяется прямолинейно, от какого источника он бы ни исходил: от гигантского Солнца или от малснького костра. И. Ньютон



положил этот факт в основу своей теории, считая, что свет состоит из мельчайших частичек — особых световых корпускул. С такой точки зрения легко и наглядно объясняется, например, образование тени. Скажем, в яркую, солнечную погоду многие пользуются зонтиками. Это простейшее приспособление для того, чтобы избежать чрезмерного загара; оно действует по принципу поглощения светового потока. Для световых корпускул зонтик играет роль экрана. Такова же его роль и во время дождя, когда экранируется поток дождевых капель. В первом случае зонтик отбрасывает тень на тротуар, а во втором — образуется небольшой сухой круг, в который не могут попасть капли.

Казалось бы, налицо полная аналогия между световыми и дождевыми корпускулами! Но уже довольно давно был обнаружен и один «неприятный» факт: края тени оказываются всегда несколько размытыми. При более подробном изучении рассеяния света на небольших препятствиях или при его прохождении сквозь малые отверстия физики выяснили, что свет попадает и туда, куда не должен был бы попадать ни в коем случае, будь он и в самом деле потоком ньютоновских корпускул. Скажем, проходя сквозь малое отверстие, свет оставляет на экране яркое пятно, но вокруг этого пятна появляются дополнительные кольца. Аналогичная картина возникает и в том случае, когда на пути светового луча помещается небольшой предмет — помимо главной тени, на экране образуются дополнительные затененные места.

Все эти явления нельзя понять с точки зрения модели прямолинейно распространяющихся световых корпускул. Если эта модель была бы верна, то зонтик или любой другой предмет отбрасывал бы абсолютно четкую, словно «ножом обрезанную» тень, не говоря уж о том, что не появлялись бы дополнительные кольца освещения или затенения. Зато такие эффекты легко объяснялись в волновой теории, согласно которой свет, как и всякая волна, должен был слегка огибать края препятствия, проникая в, казалось бы, запрещенную зону. Это явление и называется дифракцией.

Разумеется, видимый свет представляет собой лишь частный случай электромагнитного поля. Поля с другими характерными длинами волн — радиоволны, рентгеновские лучи, гамма-излучения — также способны

испытывать дифракцию на различных препятствиях, однако, чтобы образовалась ясная волновая картина, необходимо ставить опыты с такими предметами или отверстиями, которые соизмеримы с длиной падающих на них волн. Это условие нетрудно выполнить, например, для радиоволн, длина которых практически заключена в интервале от долей сантиметра до сотен километров. Препятствия такого размера, как говорится, всегда под рукой. Но чем короче волны, тем труднее отыскать необходимые препятствия. Скажем, для появления хороших дифракционных картинок при рассеянии обычного видимого света приходится устраивать особые сверхтонкие решетки. Но уже для рентгеновских лучей, обладающих гораздо меньшей длиной волны, никакими механическими средствами такие решетки сделать нельзя. Как вы помните, для доказательства их волновой природы пришлось использовать естественные тончайшие структуры кристаллических решеток вещества.

Такого же рода проблемы приходилось решать и для экспериментального открытия волновых свойств электронов, предсказанных Л. де Бройлем. Физики заранее представляли себе, что длины волн в случае электронов очень малы, и только атомно-молекулярные кристаллические решетки помогут подтвердить или опровергнуть замечательную гипотезу. В этом плане поиск ответа был достаточно целенаправленным, однако «господин Счастливый Случай» и на этот раз сказал свое веское слово...

В 1928 году американские физики Ч. Дэвиссон и Л. Джермер изучали рассеяние электронов на никеле. В распределении рассеянных частиц исследователи наблюдали какие-то слабо выраженные максимумы — своеобразное усиление «засветки»; но, поскольку эффект был очень незначительным, никто не обращал на него внимания. Во время одного из экспериментов произошла неприятность — в прибор проник воздух, и никелевый образец окислился. Чтобы не терять времени на поиск нового образца чистого никеля, физики решили устранить окисную пленку, прокаливая никель в вакуумной камере.

Повторив опыт с обновленным образцом, они увидели, что максимумы стали гораздо заметней. Конечно, сначала этот факт вызвал немалое удивление, но получившееся распределение рассеянных электронов до того

напоминало известные дифракционные картинки для света и рентгеновских лучей, что не оставалось и тени сомнения — открыта дифракция дебройлевских электронных волн! Прокаливание никелевого образца в вакууме оказало неоценимую услугу, так как наряду с устранением окисной пленки произошло укрупнение кристаллов никеля. Благодаря этому слабо выраженная дифракционная картина стала отчетливой, и рядовая работа привела к открытию мирового значения.

Буквально через несколько месяцев блестяще завершились эксперименты профессора Абердинского университета Дж. П. Томсона, который исследовал рассеяние электронов на тонких золотых пластинках, специально приготовленных для проверки дебройлевской гипотезы. Полученные им фотопластинки демонстрировали удивительное сходство с уже известными результатами опытов по дифракции рентгеновских лучей. Так сын (Дж. П. Томсон — сын известного «Джи-Джи») немного «подправил» открытие отца, доказав, что сторонники волновой природы катодных лучей были не так уж далеки от истины.

Независимо от американцев и англичанина дифракция электронов была зарегистрирована в опытах советского физика П. Тартаковского.

История предсказания и открытия волновых свойств электрона необычайно богата событиями, которые произошли на более поздних этапах развития физики элементарных частиц. Посмотрите, как интересно получается!

Во-первых, работы Л. де Бройля знаменовали первую серьезную смену моделей самой элементарной частицы. Немного перефразируя упомянутое ранее высказывание Г Липсона по поводу открытия электрона, можно отметить, что после этих работ теория частиц никогда уже не будет похожа на ту, которая существовала до установления волновых свойств.

Во-вторых, в гипотезе Л. де Бройля был использован в предельно чистой форме м е т о д а н а л о г и й, который является практически основным методом построения новых теоретических моделей, особенно в период бурного развития определенного раздела науки. Именно аналогии позволяют современным теоретикам добиваться понимания удивительно тонких закономерностей микромира.

В-третьих, опять-таки в очень чистой форме здесь

можно наблюдать всю важность теоретического опережения. Ведь, казалось бы, ничто не мешало тому же Дж. Дж. Томсону предвосхитить открытие собственного сына на 30 лет. В его лаборатории было все необходимое — и хороший поток электронов, и золотая фольга, и фотопластинки, и... не хватало только идеи дифракционного эксперимента. Можно возразить: в то время еще не знали, что фольгу следует использовать в качестве своеобразной дифракционной решетки. Пусть так, но ведь и этот факт был установлен за 16 лет до опытов Дэвиссона-Джермера и Дж. П. Томсона!

Новое свойство электрона вскоре было поставлено на службу науке. Из модели Л. де Бройля следовало, что длина волны частицы обратно пропорциональна ее импульсу: то есть с помощью достаточно быстрых электронов можно в принципе разглядеть отдельные атомы! Так родилась идея электронного микроскопа, первый образец которого заработал уже в 1931 году. Правда, практически увидеть отдельные атомы с его помощью так и не удалось, но после некоторых усовершенствований было достигнуто примерно 100 000-кратное увеличение, и физики смогли как следует разглядеть молекулярную структуру кристаллов.

Впоследствии удалось добиться еще большего увеличения, используя вместо электронов тяжелые ионы: на так называемом микроскопе Мюллера были получены красивые дифракционные картинки — снимки атомов.

Электронная микроскопия совместно с рентгеноскопическими методами буквально преобразовала экспериментальную базу биологии. С их помощью был разгадан наследственный код и решено множество других важных задач.

Обнаружив такие выдающиеся способности электрона при исследовании структуры вещества, ученые не могли, конечно, пройти мимо соблазна использовать их для решения фундаментальных физических проблем. Физики довольно рано осознали, что наряду с зондированием атомно-молекулярной структуры электронный пучок с достаточно малой длиной волны способен дать важнейшую информацию о внутреннем устройстве атомных ядер и даже отдельных элементарных частиц. Но для этого необходимо преодолеть немалый барьер — научиться создавать пучки частиц с исключительно вы-

соким импульсом. Так постепенно зарождались взгляды, открывшие новую эпоху в исследованиях микромира.

Итак, электроны продемонстрировали волновые свойства. Если разобраться в исторических фактах, то «генеалогическому древу» физики элементарных частиц ничего не угрожает. Ведь гипотезы о непрерывной (читай — волновой) субстанции, лежащей в основе всех вещей и пронизывающей пространство и время, также восходят к древним грекам. Они встречаются у великого Платона, их сторонником был, по-видимому, и сам Аристотель. Корпускулярной теории света, сформулированной во второй половине XVII века Исааком Ньютоном, противостояла волновая концепция крупнейшего авторитета в области оптики и в других разделах физики — X. Гюйгенса. И так во всей истории физики: когда один ученый говорил — «частица», почти сразу же находился другой, заявлявший не менее убедительно — «волна».

Борьба мнений в науке — необходимый и интересный процесс, но... Что же такое эти элементарные частицы на самом деле? Частицы ли это в собственном смысле слова, то есть нечто более или менее твердое, обладающее резко выраженной границей или «размазанные» по всему пространству волны?

Дальнейшее движение вперед без ответа на этот вопрос невозможно. Поэтому нам предстоит совершить еще одно путешествие в те же времена.

МАРШРУТ № 3. СНОВА КВАНТОВАННЫЙ МИР

Пока вне поля нашего зрения остались события, которые уже с 1927 года повели физику элементарных частиц по новому пути. Электрон оказался и не волной и не частицей (в классическом понимании этих образов), и древний как мир спор стал объектом внимания историков от науки и философов.

Вкратце ход решения двадцатипятивековой дилеммы выглядит следующим образом. Через некоторое время после публикации дебройлевских работ ими заинтересовался австрийский физик-теоретик Э. Шредингер. В серии работ, выполненных в 1925—1927 годах, он довел гипотезу Л. де Бройля до уровня серьезной тео-

рии и вполне справедливо назвал ее волновой механикой.

Огромное преимущество такого подхода перед так называемой «старой квантовой механикой» заключалось в построении ясного и предельно общего метода решения любой задачи о поведении микрочастиц. Этот метод был основан на знаменитом уравнении Шредингера для дебройлевских волн. Это уравнение связывало всякое изменение волны во времени с энергией частицы, с которой сопоставлена эта волна. Достаточно было только выяснить вид потенциальной энергии взаимодействия двух или нескольких частиц и ввести эту функцию в уравнение — дальше возникала чисто математическая (лишь в редких случаях — простая!) проблема. На основе такого метода практически все задачи, которые с великими трудностями и не менее великим искусством решали создатели старой квантовой механики, в первую очередь Н. Бор и его ученики, становились едва ли не упражнениями для студентов (сейчас они входят в программу III—IV курсов университета!). Но не менее важно и то, что был расчищен путь к задачам, о которых раньше и мечтать не смели.

Отдавая должное замечательным качествам волновой механики, Н. Бор и многие другие физики непрерывно полемизировали с Э. Шредингером по поводу трактовки волновой функции, для определения которой и было написано «всемогущее» уравнение.

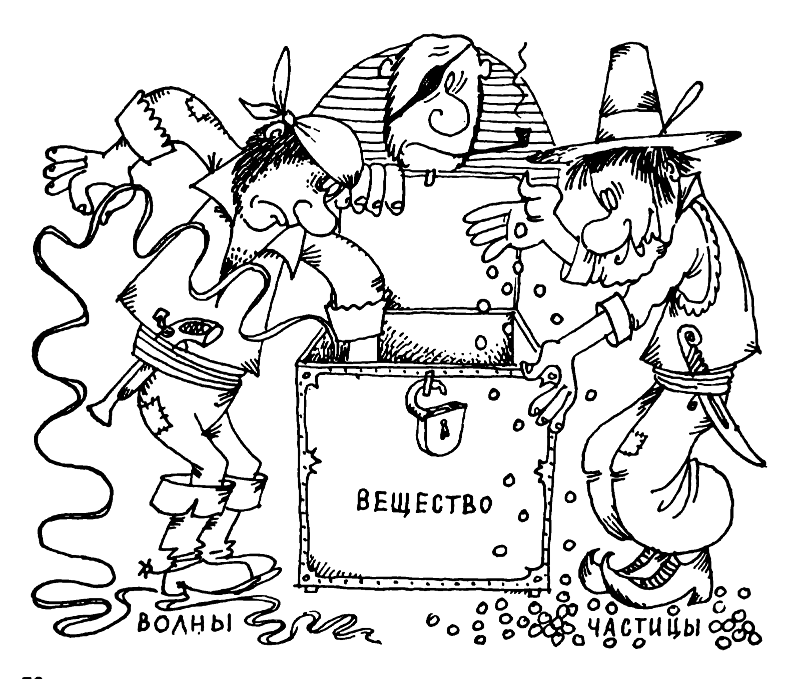
Особую остроту этим спорам придавала та позиция, которую твердо занял Э. Шредингер. Он оказался, как говорится, «еще большим католиком, чем сам папа римский» и выдвинул идею, что в природе нет ничего, кроме волн! Это был существенный шаг за рамки исходной дебройлевской гипотезы. Никаких частиц на самом деле нет, утверждал австрийский физик, о них можно говорить лишь приближенно, с точки зрения классической физики, а для волновой механики этот образ совершенно лишен смысла!

Э. Шредингер полагал, что волновая функция описывает реальный волновой процесс в пространстве подобно тому, как формулы напряженности полей описывают электромагнитные волны. Если же концентрация дебройлевских волн в некоторой малой области пространства очень велика, то возникает «нечто», напоми-

нающее частицу в обычном классическом понимании этого слова, — своеобразный волновой сгусток, ведущий себя как частица.

Дискуссия по этому поводу затронула практически всех крупнейших физиков того времени, и большинство из них не согласилось с чисто волновой концепцией электрона, считая, что частицы так или иначе должны остаться частицами. Однако сохранять корпускулярные представления стало тоже далеко не простым делом, и решение проблемы было найдено на весьма оригинальном и неожиданном пути.

В 1927 году один из лидеров «квантовой революции», М. Борн, прославившийся рядом глубоких работ в различных разделах теоретической физики, рассматривал задачу о рассеянии электронов с помощью уравнения Шредингера. Получив формальное решение, он приступил к анализу едва ли не самого сложного вопроса: что же скрывается за красивыми математическими выражениями волновой теории? М. Борн старался взглянуть на постановку задачи и на конечный результат глазами экспериментатора. Независимо от того,



что теоретики «измыслили» волновое уравнение и стараются ограничить себя только волновыми представлениями, рассуждал он, экспериментаторы всегда говорят о потоке частиц, о регистрации частиц... Может быть, это лишь вопрос удобства тех или иных слов? Может быть, люди, занятые постановкой опытов, просто не склонны к более глубокому постижению законов природы и абстрактному волновому подходу?

Нет, продолжал он, надежда на «близорукость» экспериментаторов ничем не оправдана, скорее наоборот, волновая теория не дает ясного ответа на вопрос, откуда берутся мельчайшие частицы вещества, занимающие чрезвычайно малый объем пространства. Ведь именно с ними приходится иметь дело в реальных опытах! А все слова о том, что вместо всамделишных частиц наблюдаются какие-то концентрированные волновые образования, пока не имеют под собой серьезных теоретических и экспериментальных оснований. Поэтому необходимо найти такую трактовку волновой функции, которая позволила бы, с одной стороны, сохранить естественное представление о частицах, а с другой — объяснить своеобразные волновые закономерности в распределениях этих же частиц, получающихся, скажем, при исследовании рассеяния.

Исходя из таких соображений, М. Борн пришел к поразительному заключению. Оказалось, что все становится на свои места, если считать, что волновая функция характеризует в е р о я т н о с т ь того или иного состояния реальной частицы или совокупности частиц, а вовсе не какую-то реальность типа электромагнитной волны. Точнее говоря, квадрат модуля волновой функции описывает распределение вероятности определенного состояния частицы, например, ее положения в пространстве.

На первый взгляд борновская идея удивительно проста. Представим себе источник частиц, например, тех же электронов, из которого обстреливается некоторая мишень-рассеиватель, состоящая из таких же электронов и атомных ядер. За рассеивателем перпендикулярно к направлению движения пучка электронов расположен экран, реагирующий на попадание частицы слабой вспышкой света, как говорят физики — сцинтилляцией. Если источник начнет работать в одиночном режиме, то есть электроны будут выпускаться по одно-

му, то в разных точках экрана через определенные промежутки времени будут регистрироваться отдельные вспышки, свидетельствующие о попадании отдельных частиц. Если переключить источник на генерацию интенсивного пучка электронов, то на экране появится плотное распределение вспышек. Эта картина напоминает известное распределение света, рассеянного на некотором препятствии. Итак, в первом случае электроны ведут себя как обычные частицы, а во втором демонстрируют типично волновые свойства.

Проведем теперь следующий важный эксперимент, заменив сослуживший свою службу экран специальными чувствительными фотопластинками. На первую пластинку запустим интенсивный пучок электронов — на ней должна образоваться та же волновая картина, которая была видна в аналогичной ситуации и на сцинтиллирующем экране. Сменив пластинку, включим источник в одиночный режим, и пусть установка поработает некоторое время, набирая события.

Если экспозиция была достаточно длительной, то и на второй пластинке постепенно сформируется совершенно такая же картина, как и на первой.

Теперь пора делать некоторые выводы. Во-первых, волновые свойства никак не проявлялись в каждом отдельно взятом электроне. Зато они немедленно сказываются, как только электроны соберутся в большой коллектив, то есть мы наблюдаем волновую картину для распределения большого числа событий-вспышек на сцинтиллирующем экране. Во-вторых, волновая картина не зависит от того, произошли ли все события-вспышки одновременно после запуска на экран интенсивного потока электронов, или накапливались постепенно на фотопластинке при работе источника в одиночном режиме. Как же следует трактовать получившиеся распределения с точки зрения теории?

Прежде всего отметим, что уравнение Шредингера не дает никаких предсказаний о том, в какую конкретную точку попадет электрон. Тут царит чистая случайность — каждый электрон может, испытав взаимодействие с рассеивателем-мишенью, оказаться в любой точке фотопластинки, и, как мы убедимся немного позже, не существует средств, позволяющих сделать его судьбу более определенной. Но при регистрации большого потока частиц оказывается, что одни участки фото-

пластинки засвечены сильнее, а другие — слабее, то есть на первые участки электроны попадают чаще, чем на вторые. Это и приводит в конце концов к наблюдаемому неравномерному распределению, причем интенсивность засветки в каждой точке пластинки пропорциональна частоте попадания туда отдельных частиц. Если теперь принять полную интенсивность засветки всего экрана за единицу, то доля вспышек, приходящихся на одну точку, или, как говорят физики, относительная частота попадания, определит нам вероятность того, что любой отдельно выпущенный электрон окажется в конкретной точке экрана.

Попробуем немного изменить условия опыта и поместим между источником и регистрирующей частью (экраном или фотопластинкой) мишень из другого вещества. Картина распределения изменится; ведь электроны, вылетающие из источника, взаимодействуют теперь с другими атомами, однако принцип ее формирования останется прежним. Следовательно, распределения рассеянных электронов несут сведения о том, с каким веществом происходит взаимодействие. Речь опять-таки идет о вероятностной характеристике — разные атомы, на которых рассеиваются электроны, отбрасывают их в одну и ту же точку экрана с различной вероятностью.

Разумеется, результат любого такого опыта можно рассчитать заранее, решая уравнение Шредингера.

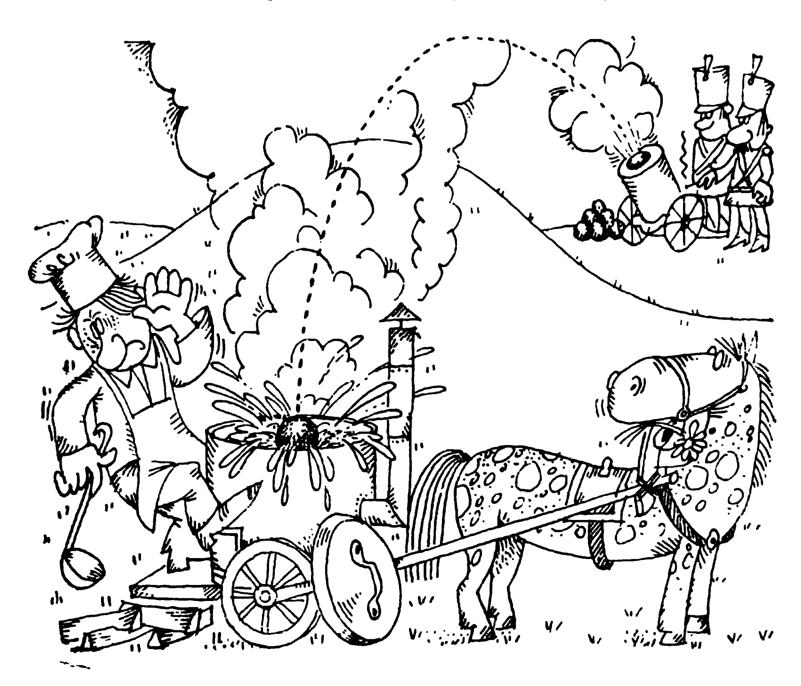
Таким образом, дебройлевские волны оказались лишь удобным вспомогательным приемом для вывода вероятностных характеристик поведения частиц в различных процессах. Такая точка зрения М. Борна, возможно, и не вызвала бы сильного потока споров, несмотря на чрезвычайную оригинальность. Более того, научная общественность с безусловным восторгом приняла бы ее в качестве временной меры спасения волновой механики, тем более что интерпретация, которой придерживался Э. Шредингер, была слишком уязвимой. Но ведь М. Борн настаивал на том, что вероятностные закономерности носят принципиальный характер и составляют суть квантовой теории.

Чтобы постичь преобразующую роль его позиции, следует обратить внимание вот на какие обстоятельства. Вероятностная точка зрения была известна и классической науке. Со случайными явлениями люди стал-

кивались и сталкиваются в самых разных областях практической деятельности.

Артиллерист, выпускающий снаряд по достаточно далекой (часто не видимой глазом) цели, никогда не может быть уверен в стопроцентном успехе. Как оценить его мастерство во время учений? Дать один снаряд и предложить в качестве мишени скрытый за небольшим холмом макет танка? Но ведь известно — опытный наводчик может и не попасть, а новичку, едва ли не впервые увидевшему орудие, удастся начисто смести макет. Случайность? Совершенно верно. Но нетрудно выяснить и закономерность. Уже при стрельбе несколькими снарядами выяснится, что взрывы опытного артиллериста происходят в среднем намного ближе к мишени, чем у новичка. Можно надеяться, что в первом случае макет будет разрушен гораздо быстрее. Источник случайности в этом примере вполне ясен — не видя цели, наводчик стреляет просто на определенное расстояние, потом немного меняет наводку, и так вплоть до попадания в мишень.

Классическая физика столкнулась со случайными со-



бытиями в процессе исследования природы тепловых явлений. Теплота обусловлена движением огромного количества молекул, образующих те или иные тела. В свою очередь, температуру тела можно определить через среднюю кинетическую энергию молекул. Пользоваться средними величинами в такой ситуации просто очень удобно и чаще всего вполне достаточно для практических целей. В классической физике предполагалось, что в принципе экспериментатор может проследить за траекторией каждой молекулы и, следовательно, полностью определить состояние микроскопического тела. Но поскольку это слишком сложная (в одном грамме обычного вещества насчитывается примерно 10^{23} частиц!) и не очень полезная процедура, лучше пользоваться вероятностным распределением молекул по скоростям, или по энергиям, или по импульсам и т. д.

В квантовой же теории ситуация радикально меняется. Теперь уже частицы подчиняются вероятностным закономерностям не потому, что определить истинную траекторию каждой из них практически слишком трудно. Такая задача, оказывается, вообще лишена смысла, поскольку траектории, попросту говоря, нет. Так микрочастицы потеряли еще одну «нормальную» черту поведения: двигаться по определенной траектории! Даже боровские орбиты электронов в атоме оказались всего лишь приближенным понятием — квантовая теория позволяет нам только узнать, с какой вероятностью электрон может находиться на том или ином расстоянии от атомного ядра.

Глубокая причина «потери траектории» электронами и другими микрочастицами была установлена немецким физиком-теоретиком В. Гейзенбергом, доказавшим знаменитые *соотношения неопределенностей* (соотношения Гейзенберга). Согласно этим соотношениям точное определение положения частицы в пространстве (ее координаты) и ее импульса или скорости в один и тот же момент времени невозможно.

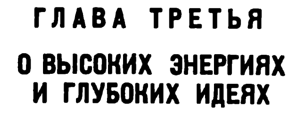
Как мы увидим в следующей главе, увеличение точности в определении координаты приводит к увеличению погрешности в измерениях импульса, и наоборот. А «потеря траектории» происходит потому, что классическая траектория требует непременного знания положения частицы и ее скорости (или импульса) в любой

момент времени. Таким образом, «потеря» видна непосредственно из точной формулировки соотношения Гейзенберга: произведение неопределенности импульса на неопределенность координаты больше или равно постоянной Планка.

Только теперь, в самом конце путешествия в квантованный мир, в нашем рассказе прозвучало имя человека, первым ступившего на его трудные тропы. Еще в 1900 году немецкий физик М. Планк, пытаясь преодолеть серьезные трудности классической физики, натолкнулся на замечательное линейное соотношение между энергией электромагнитного поля и его частотой. В качестве коэффициента пропорциональности он предложил ввести новую фундаментальную постоянную и оценил ее величину, исходя из опытных данных. Впоследствии эта постоянная, которая входит буквально во все уравнения и соотношения квантовой теории, получила название к о н с т а н т ы П л а н к а. Она обозначается символом h и имеет размерность произведения энергии на время или импульса на координату ($h \cong 10^{-27}$ эрг · сек.). Константа Планка символически разделила историю физики на две части — классическую и квантовую — и, как мы только что убедились, сыграла выдающуюся роль в новом понимании закономерностей микромира.

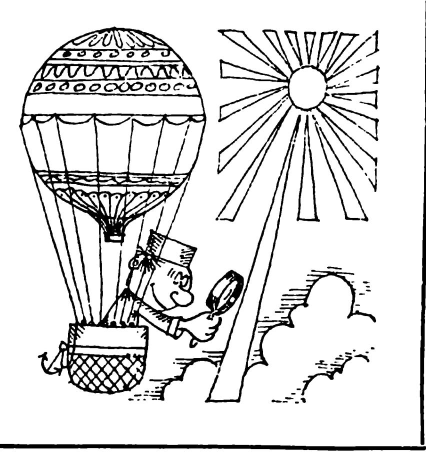
Примерно три первых десятилетия после открытия элементарных частиц физики практически полностью занимались решением главной проблемы того времени — созданием атомной и молекулярной физики. Для планомерного наступления на тайны самих частиц еще не были готовы необходимые экспериментальные и теоретические средства. Но многие из них как раз и появились в процессе расшифровки атомно-молекулярной структуры вещества.

На рубеже 30-х годов произошел явный перелом. Воодушевленные блестящими и довольно быстрыми победами в исследовании атома, физики начали по-настоящему пристреливаться к атомным ядрам и их составляющим. И хотя очередное десятилетие стало скорее «ядерным», физика элементарных частиц успела обзавестись таким количеством новых загадок, что их решение стало совершенно безотлагательным делом. Делом чести физики XX века!



ГЛАВА ТРЕТЬЯ

О ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЯХ И ГЛУБОКИХ ИДЕЯХ



Пределы наук похожи на горизонты: чем ближе подходят к ним, тем более они отодвигаются.

П. Буаст

МАСШТАБЫ БОЛЬШОГО И МАЛОГО

За последние 10—15 лет мы стали свидетелями интереснейшей филологической метаморфозы: все реже и реже в названиях конференций, учебников и обычных статей в научных журналах стало употребляться словосочетание «элементарные частицы», все чаще и чаще звучат другие слова — «высокие энергии», «при высоких энергиях»... Что это — увлечение результатами экспериментов на гигантских ускорителях или окончательная потеря доверия к прилагательному «элементарный»?

Правильно будет сказать: и то и другое. Но еще правильнее — обратить внимание на те глубокие причины, которые превратили гонку за высокими энергиями в лейтмотив постижения микромира.

Прежде всего стоит обсудить масштабы интересующих нас явлений — недаром ведь говорят: все познается в сравнении. Но масштаб, в свою очередь, — основа любого сравнения.

Современная физика действует в невообразимо большом диапазоне линейных размеров. Радиус наблюдае-

мого участка вселенной составляет примерно 10^{28} сантиметров, а наименьшие расстояния, доступные изучению на сегодняшний день, — 10^{-15} сантиметра. Представить себе столь большие и столь малые длины «в живых картинках» чрезвычайно сложно. От того, что я сообщу, например, что мерная лента длиной порядка радиуса вселенной будет весить не меньше нашей планеты, ничего к пониманию факта не прибавит. Человеческий опыт непосредственного восприятия расстояний ограничен интервалом от долей миллиметра до 1—3 километров. Вне этого интервала требуется включать некоторое воображение. Оно может быть изрядно натренировано для того, чтобы свободно измерять на глазок добрые десятки километров, как это бывает у летчиков, или считать маковое зернышко слишком большой заготовкой для вытачивания точной копии роденовского «Мыслителя», как это встречается среди умельцев — потомков великого Левши.

В сущности, аналогичную тренировку проходят и физики, для которых десятки в плюс — минус такой-то степени становятся по мере восхождения на высоты университетской премудрости чем-то вполне естественным и понятным. Как ни странно, дело здесь не в легендарных склонностях ума, а в глубоком усвоении тех понятий и образов, которые стоят за «сухой цифирью», а главное — в овладении основными принципами измерения очень больших и очень малых расстояний, масс и прочих важных характеристик. Попробуем и мы последовать по этому проверенному пути.

Прежде всего наблюдаемый диапазон размеров и расстояний следует подвергнуть традиционному разбиению на три части, каждая из которых представляет собой более или менее обособленный мир объектов и процессов.

М е г а м и р — вселенная в целом, галактики, звездные скопления, планетные системы.

М а к р о м и р — обычные предметы и процессы «нормальных», человеческих масштабов, воспринимаемые в целом, без особого углубления в структуру.

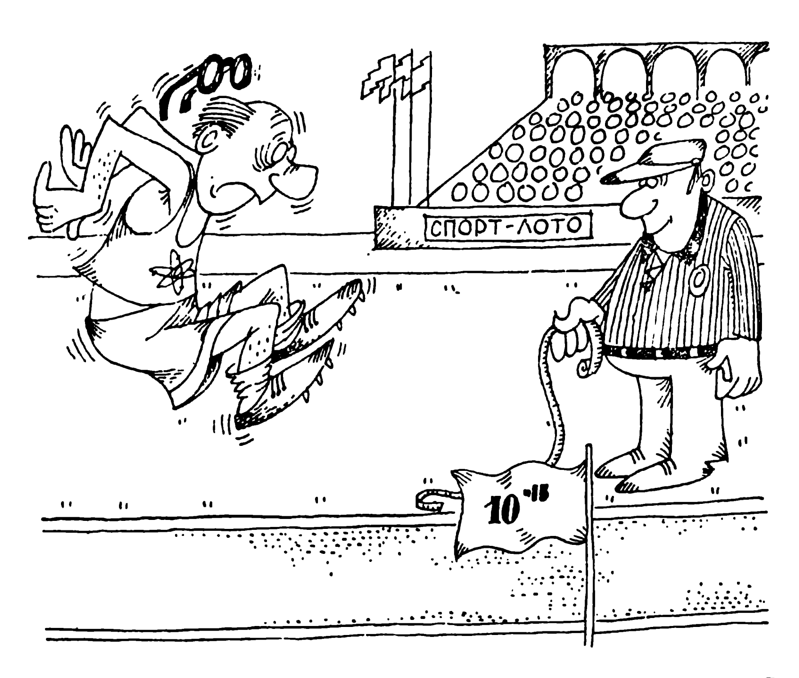
М и к р о м и р — большие и малые молекулы, атомы, атомные ядра, элементарные частицы.

Разумеется, такое разбиение весьма условно, а «миры» — лишь емкие художественные образы. Но в нем

есть своя логика, и оно оказывается достаточно полезным.

Во-первых, огромный диапазон действительно разрезается на три непересекающихся отрезка. Например, в качестве минимального мегапромежутка мы можем принять расстояние от Земли до Луны (порядка 360 тысяч километров, то есть $3{,}6 \cdot 10^{10}$ см). С теми, кто убежден в несолидности такого выбора и считает, что наименьшая подобающая для «мега» порция — размер галактического скопления, я не стал бы спорить, скорее всего это дело вкуса. Скажем, мне приятно считать, что люди побывали на пороге мегамира и на Луне отпечатались следы башмаков и колес.

Аналогичные проблемы могут возникнуть и при попытке определить границу «микро». Микромиров, в сущности, много. Для ученых, исследующих молекулы, атомы, атомные ядра и элементарные частицы, микромир начинается с примерно 10^{-6}—10^{-7} сантиметра и уходит в пока еще плохо понятные глубины. Микромир биолога раз в сто (в среднем!) больше. Разумеется, все они правы — каждый из них имеет в виду особый тип



процессов, и не стоит затевать длинные дискуссии на этот счет, тем более что мы успели выяснить, в каком смысле используется в этой книге образ «микро».

Во-вторых, объекты, расположенные по порядку своего размера вдоль всего диапазона, оказываются в очень важной взаимосвязи — они образуют так называемую структурную иерархию. В этом устрашающем словосочетании нет никаких особых тайн. Так принято обозначать следующую ситуацию — меньший в некотором смысле объект входит в качестве структурной единицы в больший, тот в еще больший и т. д.

Двигаясь от большого к малому, мы можем нарисовать такую упрощенную картинку: вселенная состоит из галактик; галактики — из звезд (точнее — из планетных систем); звезды и планеты — из вещества в различном состоянии; вещество — из молекул; молекулы — из атомов; структурными элементами атомов являются электроны и атомные ядра; а ядра состоят из протонов и нейтронов.

Из чего составлены известные элементарные частицы, мы пока не знаем. Похоже, что у последней ступеньки великой иерархической лестницы возникает своеобразный обрыв, и глубина открывающейся под ногами пропасти впечатляет не столько еще не добытым знанием, сколько тем предварительным пониманием, которое уже достигнуто. Но рассказ об этом еще впереди...

И наконец, третьей чрезвычайно полезной особенностью разделения диапазона линейных размеров является простая классификация измерений. До сих пор наш старый добрый макромир оставался немного в тени. Вроде бы ясно — самые интересные явления происходят на самых краях этого диапазона, краях, непосредственно упирающихся в полную неизвестность.

Но вот ведь в чем беда — как бы мы ни исхитрялись в штурме неведомых глубин вселенной или в непрерывных атаках на структуру вещества, все действия окажутся совершенно бессмысленными, если мы не позаботимся о путях доставки донесений с поля боя. Научные факты не носятся в безвоздушном пространстве, они добываются людьми и для людей. Иными словами, любые невообразимо малые или невообразимо большие процессы становятся достоянием науки только тогда, когда оказываются доступными нашему восприятию.

Какими бы сложными и сверхсложными приборами ни вооружались ученые, их действия на заключительном этапе снятия показаний, по существу, не будут отличаться от того, что совершали их далекие предшественники. Старинные гравюры донесли до нас неторопливые, но полные внутреннего напряжения сцены научных свершений, где главные измерения проводились с помощью обычных линеек и весов. Современные линейки могут быть существенно автоматизированы, но в конечном счете показания стрелки самого тонкого электротехнического устройства не что иное, как «прикладывание линейки» к некоторому исследуемому объекту.

Впрочем, эти показания могут непосредственно поступать в некоторый специальный автомат, переводящий их сразу в цифровые таблицы, например, в электронно-вычислительную машину. Конечно, физик, считывающий многометровые колонки чисел с длинных рулонов бумажной ленты, не особенно похож на своего древнего коллегу, задумчиво взирающего на уровень жидкости в сосуде причудливой формы. Но в этих картинах намного больше внутреннего сходства, чем внешних различий, — оба исследователя изучают явления в доступной для человеческого восприятия форме.

Поэтому одна из важнейших задач создателей приборов — свести заключительный этап измерений к обычному эксперименту с макроскопическими объектами, то есть не слишком большими и не слишком малыми по объему, массе и прочим характеристикам телами. Причем практически основную роль играет удобный, соизмеримый с человеческими возможностями линейный масштаб. Фотопластинки в специальных устройствах, подсоединенных к телескопу, переводят гигантские пути далеких звезд в маленькие черточки, доступные простым лабораторным измерениям. В уже знакомой нам камере Вильсона пролетающая частица нарушает покой огромного числа атомов, и они, потревоженные, подают коллективный «сигнал бедствия» бледными полосками сконденсировавшихся паров, после чего в ход пускаются стандартные геометрические принадлежности.

Таким образом, измерительные операции можно условно разделить на три класса. Центральное место не только по положению относительно диапазона раз-

меров, но и по смыслу занимают обычные измерения с макроскопическими телами. Операции в «мега» и в «микро» отличаются прежде всего массой дополнительных устройств, обеспечивающих своеобразную проекцию в наш макромир. Как правило, эти устройства усиливают слишком слабые и ослабляют слишком сильные сигналы, делая их доступными для наших органов чувств. Огромные телескопы собирают свет далеких звезд и галактик, позволяя увидеть множество удивительных явлений на совершенно темных для невооруженного глаза участках неба. Специальные фильтры помогают исследовать довольно тонкие детали поведения нашего ярчайшего центрального светила.

Вообще история астрономических измерений — настоящий оптико-геометрический роман с многими почти детективными поворотами сюжета; но пересказ его содержания не входит в наши цели.

Основные принципы проектирования из «микро» в «макро» фактически уже проиллюстрированы рассказами о камере Вильсона, беккерелевском открытии и мысленным экспериментом со сцинтиллирующим экраном и фотопластинками, которые приведены в предыдущей главе. Главная идея всех решений проблемы доступности — вызвать с помощью микрочастицы коллективное возмущение атомов вещества, заранее приведенного в состояние «полной боевой готовности».

Однако с измерениями в микромире связаны не только многочисленные технические трудности, бросающие вызов всем областям науки, участвующим в создании необходимых приборов. Существуют и некоторые принципиальные ограничения.

Предположим, мы хотим выяснить положение электрона в пространстве и скорость, с которой он движется. Для определения положения электрона прежде всего необходимо его осветить. Причем чем точнее мы хотим знать, где он находится, тем короче должна быть длина волны используемого освещения. Это общее правило, следуя которому создаются, например, микроскопы и любые другие приборы для обнаружения и изучения тех или иных препятствий. Скажем, для обнаружения самолета используются радиоволны дециметрового диапазона. Самолет имеет размеры порядка нескольких метров, то есть в десятки раз больше, чем длина волны «освещения», и радиолокационной установки

в дециметровом диапазоне достаточно для того, чтобы он не проскочил незамеченным. Хорошо известно, что обычные оптические микроскопы — сколь бы мощными линзами их ни снабжали — имеют предел применимости: в них нельзя рассмотреть объекты, размер которых меньше длин волн видимого света. Практически же наблюдать можно лишь объекты, размер которых раз в десять превосходит длину волны излучения, которым освещается объект.

В нашем мысленном эксперименте все позволено. Мы можем не ограничиваться сравнительно длинноволновым излучением, характерным для радиодиапазона или видимого света, а использовать, например, ультрафиолетовое, рентгеновское или даже гамма-лучевое освещение. Более того, мы можем вообразить особое устройство, которое позволяет сколь угодно уменьшать длину волны. Такое устройство — величайшая, но пока, увы, недосягаемая мечта исследователей; однако его вполне можно использовать в мысленном опыте — оно не противоречит никаким принципам физики!

Но правило, которое мы применяли в случае радиолокационной установки или оптического микроскопа, будет действовать и в любом другом случае. Оно связано с волновой природой электромагнитного поля и в более точном виде звучит так: *погрешность в определении размера или положения некоторого объекта никогда не может быть сделана меньше длины волны используемого освещения.*

Разумеется, имея под рукой чудесное устройство для беспредельного уменьшения длины волны, мы способны сделать и погрешность сколь угодно малой, то есть определить положение интересующего нас электрона со сколь угодно высокой точностью. Но тут-то оказывается, что мы начисто теряем возможность решить вторую часть поставленной задачи; как вы помните, необходимо определить еще и скорость электрона.

В этом пункте неприятности наступают из-за двойственной природы электромагнитного поля. Оно ведь может быть представлено и как поток фотонов! Но фотон обладает определенным импульсом, причем этот импульс пропорционален частоте или обратно пропорционален длине волны. Падая на электрон, фотоны будут передавать ему часть импульса, то есть

сообщать дополнительную скорость — этот процесс соответствует эффекту Комптона. Погрешность в определении импульса электрона как раз и равна (примерно!) импульсу, который фотон передает электрону в каждом отдельном акте соударения. В свою очередь, переданный импульс приблизительно равен фундаментальной постоянной Планка (h), деленной на длину волны.

Теперь займемся простой алгеброй — перемножим погрешности в определении как положения электрона (Δx), так и его импульса (Δp). Оказывается, что их произведение вообще не зависит от длины волны освещения и примерно равно постоянной Планка! Заключительная формула имеет вид соотношений неопределенностей Гейзенберга: $(\Delta x) \cdot (\Delta p) \approx h$.

Разобранный здесь мысленный эксперимент был придуман в свое время самим В. Гейзенбергом для наглядного вывода одного из вариантов своих знаменитых соотношений и даже имеет особое название — микроскоп Гейзенберга.

Этот эксперимент действительно в чрезвычайно наглядной форме показывает, что к определению наблюдаемых величин в микромире следует подходить с особой осторожностью. Казалось бы, чего уж проще — решили измерить положение частицы и ее импульс, или скорость, а оказывается, что без света ничего сделать нельзя (нет наблюдения!), а со светом одновременное точное определение двух величин — координаты и импульса — вообще невозможно.

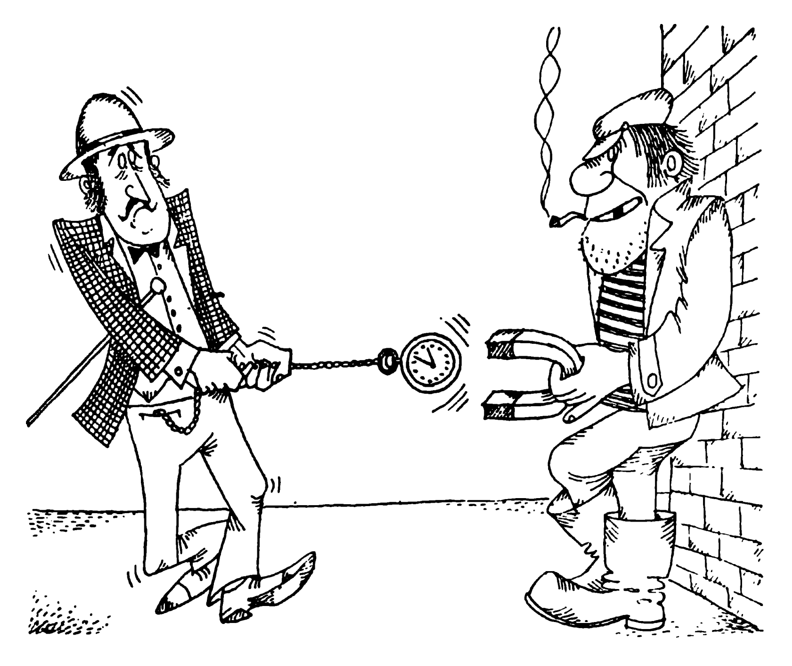
С точки зрения квантовой механики наша ошибка заключена уже в самой постановке задачи — электрону не следовало заранее приписывать свойство «обладать одновременно точным значением координаты и точным значением импульса». Это просто неоправданное распространение классических представлений из привычного для нас мира больших и тяжелых тел на ту область, где они неприменимы.

Таковы основные сложности, подстерегающие всех, кто пытается получить полезную информацию об устройстве микромира. Однако если трудности в создании приборов преодолены, а квантовомеханические тонкости учтены, остается главный вопрос: как пробиться к очень малым расстояниям?

Очевидный путь связан с получением все меньших

и меньших длин волн, разумеется, не только световых, но и дебройлевских волн любых элементарных частиц. Фактически же, поскольку дебройлевская длина волны обратно пропорциональна импульсу частицы, следует создавать пучки частиц, обладающих все более высоким импульсом. Следовательно, тайны сверхмалых расстояний могут раскрыться только перед теми, кто сумеет использовать в своих экспериментах частицы с достаточно высокими энергиями. Прорыв к малым и сверхмалым пространственным областям — бесспорно, достойная цель и одна из главнейших причин упомянутой выше «филологической метаморфозы». Однако за такой формулировкой задачи кроется на самом деле более глубокое содержание.

Внутренность пустой коробки, очень большой или очень малой, вряд ли может кого-нибудь заинтересовать. Точно так же, для нас важны не впечатляющие пространственные размеры вблизи краев рассмотренного диапазона — 10^{-15} или 10^{28} сантиметров, — а те объекты и процессы, которые «за ними скрываются». Нам необходимо выяснить, не существуют ли за послед-



ней достигнутой пока ступенькой великой иерархической лестницы под названием «элементарные частицы» какие-то новые ступени, где еще не отпечатаны следы «всепроникающих человеческих башмаков». Не отыщутся ли там какие-то неведомые субэлементарные объекты, из которых на самом деле выстроены все известные сейчас частицы?

Весь исторический опыт, накопленный физиками, вроде бы выступает за положительный ответ. Ведь до сих пор в процессе исследования структуры вещества неизменно обнаруживался долгожданный следующий уровень строения. Действительно, составные объекты — очень частое явление. Под ними можно понимать совокупность каких-то иных, более простых объектов, называемых частями, которые связаны между собой определенными силами. Кусок железа, притянутый магнитом, — хороший пример типично составного объекта. Если мы заранее договоримся, что на расстоянии, скажем, одного метра друг от друга взаимодействием магнита с куском железа можно пренебречь, то, измеряя усилие, которое необходимо приложить для их разделения, предположим, оно оказалось равным 1 кГ (килограмм силы), мы без труда вычислим работу, затраченную на превращение одного составного объекта в две независимые части: в данном случае эта работа составляет один килограммометр (по-другому она называется энергией связи).

Энергия связи чрезвычайно важное понятие в микромире. Чтобы ионизировать атом, необходимо совершить работу по удалению электрона на достаточно большое расстояние от атомного ядра. Такую работу способен проделать, например, фотон, энергия которого превышает энергию связи электрона в атоме. Именно этот механизм и лежит в основе фотоэлектрического эффекта.

Понятие энергии связи пронизывает буквально все наши представления о структуре вещества. Вот перед нами знаменитая цепочка — четыре обычных состояния вещества: твердое тело, жидкость, газ, плазма.

В твердом теле связи между атомами наиболее сильны, они образуют как бы жесткую сетку.

При нагревании эти связи начинают разрушаться — с ростом температуры атомы приобретают все большие кинетические энергии. Вещество переходит в жидкую

фазу, жесткая сетка связей сохраняется лишь местами, во всяком случае, ее обычно не хватает для того, чтобы тело самостоятельно поддерживало прежнюю форму.

При еще более сильном нагревании практически все атомы приобретают достаточно большие кинетические энергии для преодоления энергии межатомных связей, вещество становится газообразным.

И наконец, дальнейший нагрев начинает разрушать внутриатомные связи. Электроны отрываются от ядер, возникает своеобразная горячая смесь из электронов и положительно заряженных ионов, называемая плазмой.

Каковы же порядки величин различных связей в микромире? По традиции, возникшей практически одновременно с самой физикой элементарных частиц, их энергию принято измерять в электрон-вольтах. Один электрон-вольт — это энергия, которую приобретает электрон, ускоряясь разностью потенциалов в один вольт. Сокращенное название этой единицы — эВ (по специальному международному соглашению теперь принято даже в сокращенных обозначениях использовать заглавные буквы, если название единицы происходит от имени какого-либо ученого — в данном случае речь идет о выдающемся итальянском исследователе XVIII века А. Вольте). Более крупные единицы образуются по обычным правилам «метрического фольклора»: 1 килоэлектрон-вольт (КэВ) = тысяче электрон-вольт, 1 мегаэлектрон-вольт (МэВ) = миллиону эВ, 1 гигаэлектрон-вольт (ГэВ) = миллиарду эВ, 1 тераэлектрон-вольт (ТэВ) = 10^{12}эВ.

С точки зрения макроскопических представлений электрон-вольт очень маленькая энергетическая величина; даже один ТэВ составляет всего-навсего 1,6 эрга. Но если речь идет о том, чтобы сообщить энергию в один электрон-вольт каждой частице большого куска вещества, впечатление заметно меняется — вещество необходимо разогреть примерно до 7700 градусов!

В мире атомов и молекул характерные энергии связи заключены в интервале от малых долей электрон-вольта до нескольких электрон-вольт.

Для атомных ядер масштаб увеличивается примерно в миллион раз.

Теперь мы вполне готовы к тому, чтобы оценить, насколько хороши представления, типичные для составных моделей, например: «атом состоит из ядра и не-

скольких электронов», или: «атомное ядро состоит из протонов и нейтронов».

Высказывание о некотором элементе структуры имеет смысл тогда, когда он сохраняет свою индивидуальность, то есть когда его можно охарактеризовать одними и теми же (хотя бы почти одними и теми же) параметрами независимо от того, внутри ли структуры он находится или вне ее.

Естественно, основным энергетическим параметром элементарной частицы является ее масса. Массы частиц принято оценивать в энергетических единицах, причем пересчет из граммов в электрон-вольты (сначала в эрги!) осуществляется по знаменитой эйнштейновской формуле: $E=Mc^2$, здесь c — скорость света в пустоте, равная примерно $3 \cdot 10^{10}$ см/с. Так, масса электрона составляет $9{,}1 \cdot 10^{-28}$ грамма, или 0,51 МэВ. Для протона 938,28 МэВ, то есть около одного гигаэлектрон-вольта. Масса нейтрона примерно на 1,3 МэВ больше массы протона.

Для оценки «качества» составной модели мы можем теперь использовать такую полезную величину, как отношение энергии связи к массе легчайшей элементарной частицы, входящей в структуру. Эта величина характеризует, грубо говоря, долю массы, которую частица должна потерять, находясь внутри структуры.

В случае атомов указанное отношение чрезвычайно мало — всего несколько миллионных долей единицы. Следовательно, представление об электроне как о структурной единице атомов с огромной степенью точности оправданно. В атомных ядрах ситуация не столь блестящая; указанное отношение порядка — несколько тысячных долей, но и этого достаточно для разумного определения ядра как системы, составленной из протонов и нейтронов.

Таким образом, мы ответили на поставленный ранее вопрос, обсудив не только качественную сторону дела, но и обнаружив простую возможность количественной оценки.

Что же можно теперь сказать по поводу субэлементарного уровня и возможных составных частей элементарной частицы? На самом деле этот вопрос сам является «составным» — в нем явно выделяются два различных оттенка.

Первый из них таков — не являются ли некоторые

из известных частиц «более элементарными», чем другие, и нельзя ли, следовательно, использовать их в качестве структурных элементов для построения остальных «менее элементарных», возможно, составных частиц?

По-видимому, такая возможность не слишком привлекательна, поскольку отношение энергии связи к массе оказывается в данном случае порядка единицы. А это значит, что одна элементарная частица внутри другой должна расстаться со своей массой, то есть практически полностью потерять свою индивидуальность. Поэтому, если в результате соударения двух элементарных частиц образовалась еще одна, новая частица, у нас нет оснований утверждать, что она «скрывалась» в одной из столкнувшихся. Разумнее полагать, что новая частица родилась непосредственно в процессе взаимодействия исходных двух.

Проблемы, связанные с таким представлением, нам еще предстоит обсудить в последующих главах.

Вторая трактовка вопроса — не могут ли существовать субэлементарные частицы, абсолютно непохожие на обычные, известные нам элементарные? Тут мы рискуем вступить в область пророчеств на тему «появится ли то, не знаю что». Запретить появление чего-то с неопределенными свойствами, разумеется, нельзя. Современная физика элементарных частиц уже выработала несколько очень интересных конкретных моделей для объектов нового типа, и мы в дальнейшем обсудим их довольно подробно.

Итак, мы установили одну из основных причин интереса к пучкам частиц очень высоких энергий: не скрывается ли за уже достигнутым уровнем строения вещества некий новый уровень с необычайно большими энергиями связи? Но существуют и иные, не менее веские причины — они всплыли в процессе уже развернувшейся гонки за высокими энергиями, и о них речь впереди...

О ПРОСТОМ ЛЮБОПЫТСТВЕ, ВОЗДУХОПЛАВАНИИ И КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ

Своим первым прорывом в область высоких энергий физика элементарных частиц всецело обязана замечательному «дару небес» — космическим лучам, по-

току очень быстрых частиц, приходящих из глубин вселенной и непрерывно бомбардирующих нашу планету.

Прежде чем приступить к обсуждению этого интереснейшего явления природы, еще раз воздадим хвалу великому, внешне случайному, но логически совершенно необходимому открытию естественной радиоактивности элементов. Открытию, которое не только позволило получить первые сигналы о ядерных превращениях, но и подарило уникальное средство зондирования структуры вещества. Однако оно сыграло еще одну крайне любопытную и весьма важную роль. Перед наукой замаячили необычайно привлекательные возможности поиска самых разнообразных «таинственных излучений». И наука с небывалой активностью принялась их отыскивать, объяснять и использовать.

Пожалуй, самая крупная находка на этом пути обнаружилась несколько неожиданно. Существовала старая загадка, знакомая всем исследователям статического электричества. Загадка мучительная, создающая изрядные помехи в экспериментах, — самопроизвольная утечка заряда с хорошо изолированного проводника. Современным физикам, которые на страницах романов, на экранах и, что греха таить, в реальной лабораторной жизни умеют ловко вышибать дух неповиновения из капризных осциллографов и другой прецизионной аппаратуры, трудно поверить, что мудрые классики прошлых веков испытывали немалые неприятности с обычным электроскопом. Тем самым прибором-ветераном, вписавшим немало славных страниц в историю физики и так естественно вписавшимся в уютные интерьеры школьных кабинетов.

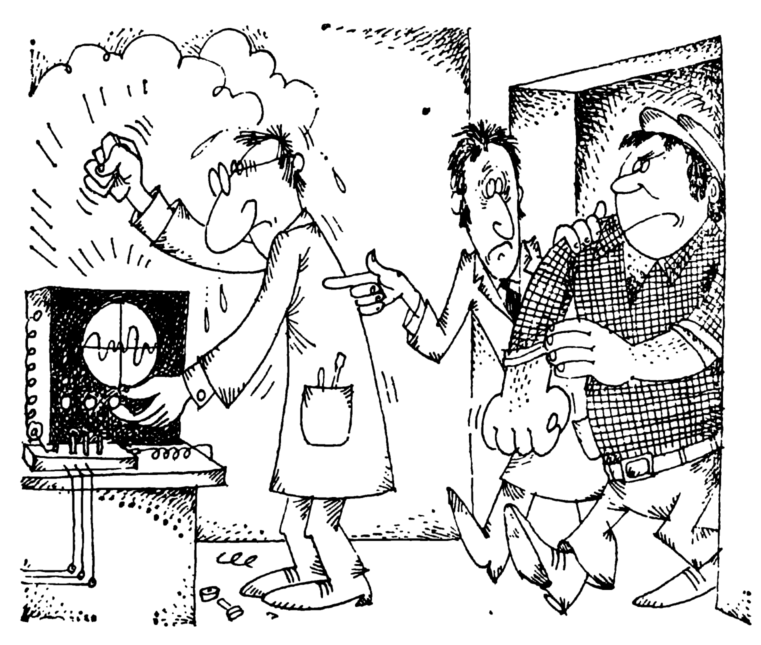
Вероятно, первым, кто отнесся к эффекту утечки заряда со всей серьезностью, как к предмету исследования, а не просто досадной помехе, был французский ученый Ш. Кулон — военный инженер, который увлекся изучением электричества уже на полувековом рубеже своей жизни и успел сформулировать основные законы взаимодействия покоящихся зарядов и магнитов.

Основываясь на исключительно тщательных измерениях, Ш. Кулон убедился, что количество электричества на проводнике, окруженном воздухом, быстро убывает с течением времени. Он попытался и объяснить этот эффект наиболее правдоподобным образом: подставки и окружающий воздух, полагал Ш. Кулон, не

являются идеальными изоляторами, часть заряда уходит через подставку, часть — уносится частицами воздуха, которые сталкиваются с проводником, захватывают долю заряда и потом отлетают под действием сил отталкивания (ведь на частицах воздуха и на проводнике заряды одного знака!).

Такое простое и наглядное объяснение продержалось в физике до начала нашего века, пока не было твердо установлено, что действие радиации, в частности гамма-излучения, ведет к созданию условий для утечки заряда. С другой стороны, исследователи обнаружили, что радиоактивные вещества рассеяны по всей земной коре (как раз в это время закладывался фундамент радиационной геофизики). И наконец, прямые измерения скорости самопроизвольного разряда электроскопа в различных условиях показали, что хорошая экранировка свинцовыми пластинками заметно замедляет утечку.

Все эти факты свидетельствовали о недостаточности гипотезы Ш. Кулона. Многие физики стали думать, что утечка связана с влиянием гамма-лучей, испуска-



емых элементами земной коры. Эта идея оказалась весьма популярной, хотя и недолговечной. Как всегда, были сомневающиеся, которые говорили о совсем иных источниках излучения, действующего на электроскопы. Законы разряда одинаковы в различных точках земного шара, указывали они, и трудно поверить, что радиоактивные вещества распределены абсолютно равномерно; скорее всего излучение должно иметь какие-то внеземные и очень удаленные области возникновения, тогда, и только тогда, становится понятным его равномерное распределение по всей поверхности Земли...

И вот в такой ситуации именно сомневающиеся получили неожиданную поддержку благодаря включению в игру нового средства исследований. Это новое средство — воздушные шары, позволяющие эксплуатировать многокилометровые толщи атмосферы в качестве уникального экрана. Если поток радиации исходит из земных недр, то на достаточном удалении от поверхности он будет уменьшаться из-за экранировки воздухом, и, наоборот, поток космической радиации должен возрастать по мере удаления от Земли. Итак, возникла остроумная идея — проверить закономерности разряда электроскопа на различных высотах.

Надо сказать, что воздухоплавание начала нашего века делало свои «вторые шаги», выходило из области увлечения полетами как таковыми в область научных исследований в атмосфере. Здесь стоит отметить интересную аналогию с совсем уже близкими нам событиями. После первых успешных запусков искусственных спутников Земли и детальной отработки программы полетов центр тяжести переместился в область создания крупных орбитальных научных станций, способных собирать огромную информацию об околоземном и межпланетном пространстве. И одним из важнейших достижений космических лабораторий было продолжение и всестороннее развитие тех работ по изучению внеземных излучений, которые были начаты в 1909 году швейцарцем К. Гёккелем, впервые установившем электроскоп на воздушном шаре.

К. Гёккель обнаружил, что на высоте 4 километров электроскоп теряет заряд быстрее, чем на поверхности Земли. Примерно через четыре года серию аналогичных опытов завершил физик из Австрии В. Гесс. Его данные были достаточно полны для того, чтобы сде-

лать важнейший вывод — излучение, вызывающее «самопроизвольный» разряд электроскопа, не связано с земной корой, оно имеет либо космическое, либо атмосферное происхождение. Сам В. Гесс больше склонялся к первому варианту, а второй рассматривал скорее всего как возможное сопровождающее явление или не до конца исключенную альтернативу. За такую удивительную прозорливость и, конечно, за получение первых доказательных результатов он был впоследствии удостоен Нобелевской премии.

Между тем окончательный выбор модели затянулся еще примерно на 10 лет из-за обилия противоречивых экспериментальных данных. Физики так и не смогли получить убедительных доказательств космической гипотезы из заоблачных высот. И тогда они сделали внешне парадоксальный, но, по сути дела, простой до очевидности «ход конем»: решили извлечь истину буквально из-под земли. Начиная с 1923 года были проведены три серии глубинных экспериментов. Ионизационные свойства излучения были изучены с помощью приборов, установленных в глубокой альпийской расщелине, на 20-метровой глубине одного из калифорнийских озер и, наконец, на различных глубинах (вплоть до 220 метров!) озера Констанца.

Результаты этих исследований фактически закрыли атмосферную гипотезу. Стало ясно, что новый вид радиации обладает фантастической проникающей способностью. Мало того, что излучение пронизывало всю земную атмосферу, оно проникало сквозь слой воды, эквивалентный утроенной толщине атмосферы!

Отсюда следовало, что частицы нового излучения должны обладать огромными энергиями, в тысячу и более раз превосходящими энергии, характерные для земных радиоактивных источников.

Итак, поиски на земле, в небе, под землей и под водой увенчались замечательной находкой: был обнаружен тщательно замаскированный природой клад, размеры которого до сих пор не так-то просто оценить — клад, открывший совершенно новую эпоху в изучении структуры вещества, позволивший в буквальном смысле по-новому взглянуть на вселенную. При этом физики столкнулись с двумя захватывающими проблемами. Во-первых, нужно было немедленно постигать законы поведения элементарных частиц и

атомных адер при очень высоких энергиях. Во-вторых, стало ясно, что вселенная светится в потрясающе широком диапазоне частот и не только электромагнитными волнами, но и буквально всей таблицей Менделеева — от протонов до тяжелых ядер.

Следовательно, гигантские межзвездные и межгалактические пространства — не какие-нибудь «хладные пустыни», где нет-нет, да и скользнет одинокий луч света, а вместилища сверхгорячего, хотя и очень разреженного, газа микрочастиц. Следовательно, космос живет бурной жизнью — в недрах звезд непрерывно происходят ядерные превращения, и сигналы об этих событиях уходят в космос... И еще появилось множество поражающих воображение «следовательно», и родились новые, достойные наших усилий проблемы.

В 1925 году американский физик Р. Милликен — один из главных участников заоблачных и подводных экспериментов — предложил для потоков высокоэнергетических частиц, приходящих из космоса, очень удачное название — космические лучи. Их природа была окончательно установлена в 1927 году благодаря опытам советского физика Д. Скобельцына, который сфотографировал следы частиц космического излучения с помощью камеры Вильсона. В 1931 году Р. Милликен и Ч. Андерсон провели первое тщательное измерение энергии космических лучей. Для этого пришлось специально придумать метод ослабления пучка, ведь энергия космических частиц была так велика (порядка нескольких гигаэлектрон-вольт), что позволяла им практически не реагировать на отклоняющее магнитное поле!

На этом первооткрывательский период завершился, и космические лучи начали демонстрировать богатейшую копилку сюрпризов. Но, прежде чем мы займемся ее содержимым, давайте немного обсудим возникающие теперь «семейные проблемы».

В конце 20-х — начале 30-х годов физика элементарных частиц делает огромный шаг вперед. Открытие космических лучей, по сути дела, приводит к появлению нового раздела — физики высоких энергий. О точной дате рождения этой науки договориться не так уж и просто. Ее можно связать и с первыми доказательствами, добытыми на шарах, и с определяющими результатами экспериментов Д. Скобельцына.

Я думаю, что именно пятилетие 1927—1931 годов было порогом, преодолев который исследователи смогли со всей определенностью сказать: мы имеем дело с новым типом объектов — элементарными частицами с очень высокими энергиями. Во всяком случае, возник основанный на результатах измерений количественный критерий для выделения особого предмета исследований.

Конечно, для выделения особой области исследований нужны не количественные, а уже качественные отличия основных объектов, иначе буквально к каждой цифре энергетического диапазона можно прикрепить по «бирочке» с каким-нибудь оригинальным названием! Но в физике качественная новизна, как правило, связана с преодолением некоторого количественного, часто говорят, критического рубежа. Например, трудно усомниться в том, что твердое тело и жидкость — качественно разные состояния вещества. Не достаточно ли говорить об одном веществе, одновременно указывая температуру ниже или выше точки плавления? Оказывается, нет. При переходе не все свойства меняются непрерывным образом, скажем, высокая упорядоченность атомов в твердом теле возникает «скачкообразно».

В микромире тоже существуют критические значения энергии, они связаны с величинами масс элементарных частиц. Массы частиц (как мы уже договорились, массы будем выражать в энергетических единицах) располагаются в интервале от нуля до примерно 4 гигаэлектрон-вольт, причем подавляющее большинство частиц имеют массы свыше 100 мегаэлектрон-вольт. Космические лучи в отличие от всех ранее известных радиоактивных источников обладали кинетическими энергиями не только в указанном интервале, но и намного большими. Благодаря такому огромному запасу энергии при их соударениях с другими частицами и атомными ядрами атмосферы могли образовываться любые новые частицы. Именно в этом и состоит качественно новый наблюдаемый эффект.

Так что появление на арене космических лучей стало прологом к физике высоких энергий, прологом интересным и многообещающим.

И нам стоит остановиться лишь на нескольких, но, пожалуй, наиболее драгоценных сюрпризах из обширной «космической шкатулки».

Уже в 1932 году Ч. Андерсон, изучая отклонения космических пришельцев в магнитном поле, установил, что некоторые следы в камере Вильсона соответствуют положительно заряженным частицам с массой электрона. Ими оказались **позитроны** — своеобразные антиподы электронов. Так превратилось в экспериментально доказанный факт предсказание релятивистской квантовой механики, удвоившее наблюдаемый мир. Это предсказание возникло на стыке двух мощных потоков новых представлений следующим образом.

К середине 20-х годов пересеклись пути квантовой механики и теории относительности: необходимо было построить уравнение Шредингера для электрона, движущегося с большими скоростями. С этой проблемой блестяще справился двадцатишестилетний английский физик-теоретик П. Дирак.

То, что обычно называют уравнением Дирака, представляет собой красивую форму записи четырех довольно хитро переплетенных между собой уравнений. Эту систему так называемых дифференциальных уравнений с помощью специальных преобразований можно



привести к вполне прозрачной алгебраической форме. И тут возникает эффект, хорошо известный всем, кто решал обычные квадратные уравнения и имел удовольствие получать в качестве корней два числа, равных по абсолютной величине, но имеющих противоположные знаки. Разумеется, для упражнения из задачника по алгебре ничего страшного в таком решении нет. Отрицательные или положительные корни — какая разница! А вот при решении уравнения Дирака оказалось, что именно в этом таятся огромные опасности. Просто-напросто одно из решений этого уравнения соответствовало электрону с положительной массой, а другое — с отрицательной!

Эта неприятность родилась вместе с уравнением Дирака в 1928 году, и неприятность действительно не малая — где это видано, чтобы частица имела отрицательную массу? И вообще, что значит отрицательная масса? Если бы такое было возможно, то обычные электроны стали бы самопроизвольно «проваливаться» на отрицательные энергетические уровни, излучая гамма-кванты! Через три года молодой физик сам предпринял отважную попытку спасти свое творение, подвергавшееся острой и вполне основательной критике со стороны ведущих теоретиков. Он воспользовался недавно открытым принципом Паули, запрещавшим двум электронам находиться в одинаковых состояниях.

К этому времени принцип Паули был хорошо проверен «в деле». С его помощью удалось объяснить правила формирования электронных оболочек различных атомов, придать четкий физический смысл такому чисто химическому понятию, как валентность, то есть в конечном счете установить физическую основу известной группировки элементов в таблице Менделеева.

П. Дирак предположил, что все уровни с отрицательными значениями энергии полностью заполнены обычными электронами, причем всю совокупность таких уровней (ее назвали «дираковским морем») нельзя наблюдать без специального воздействия. Чтобы добыть электрон из «дираковского моря», необходимо сообщить ему положительную энергию, достаточную для образования двух электронов. В этом случае мы будем наблюдать обычный электрон с положительной энергией, но, кроме него, в «дираковском море» возникает вакантное место — своеобразная «дырка», ко-

торая обладает свойствами обычного электрона, но с противоположным (положительным) знаком заряда. Разумеется, массы обеих частиц положительны, поскольку вначале была сообщена энергия, которой достаточно на образование двух частиц с массой электрона. Вся разница состоит в том, что «дырка» должна нести положительный электрический заряд — из-за этого ей присвоили и второе имя: антиэлектрон, или позитрон.

Дираковское предсказание касалось на самом деле не только электрона, но и любых частиц — каждой из них полагалось иметь по своему антиподу, лишь в редких случаях частица тождественна своей античастице, например, фотон. Эта идея — поразительный пример предоткрытия, поскольку впоследствии ни один физик не высказал по-настоящему серьезных сомнений не только в существовании отдельных античастиц, но и целых антигалактик. Наблюдались лишь некоторые колебания, связанные с томительно долгим ожиданием экспериментального открытия антипротона (целых три десятилетия!).

Сейчас также наблюдаются определенные колебания в отношении к антимирам «макро» и «мега». А вдруг они вообще не обнаружатся, тем более что современная «антитаблица Менделеева» доведена только до антигелия, открытого советскими физиками в Институте физики высоких энергий под Серпуховом? Почему в ближайшей к нам области вселенной вещество очень сильно преобладает над антивеществом, тогда как на уровне микромира все выглядит в высшей степени симметрично?

Это интригующая проблема. Решение ее может привести к гораздо более впечатляющим последствиям, чем могли себе представить самые смелые писатели-фантасты, давно уже применяющие огромные объемы антивещества для ускорения звездолетов до околосветовых скоростей.

А дело заключается в следующем. При столкновении частицы с античастицей происходит так называемая аннигиляция, то есть взаимодействующие частицы исчезают, а вместо них охотно образуются другие частицы.

Сам термин «аннигиляция» (буквально — превращение в ничто, уничтожение) связан с наиболее нагляд-

ным примером этого процесса: самый вероятный исход встречи электрона и позитрона состоит в их гибели с одновременным рождением двух энергичных фотонов. Если такая реакция происходит с большим количеством вещества и антивещества, то образуется мощнейший световой поток преимущественно из жестких гамма-квантов, а при наличии подходящего фокусирующего зеркала нетрудно построить модель реактивного двигателя для звездолета...

Но фантазии фантазиями, а механизм аннигиляции ведет к предельному, с точки зрения современных физических представлений, энерговыделению. Практически вся масса вещества может быть переведена в энергию излучения, которую в принципе не запрещено преобразовывать в другие удобные формы. Не исключено, что именно «аннигиляционные реакторы» определят энергетический потенциал XXI века, но для этого надо научиться собирать и удерживать антивещество в достаточно больших количествах. Пока же получение микроскопических доз антивещества съедает целые океаны электроэнергии. Короче говоря, такие идеи еще очень далеки от практического воплощения, или, лучше будет сказать, нам кажется, что далеки.

Обратите внимание — первый же шаг в область высоких энергий принес совершенно новое и неожиданное явление. Причем неожиданное в абсолютном смысле этого слова. Например, волновая гипотеза Л. де Бройля не была предугадана физикой прошлых лет сколь-нибудь определенным образом. Тем не менее вскоре после ее появления стало понятно, что волновые представления о веществе — долгожданные гости: из глубин истории сразу всплыло великое противостояние Фалеса и Платона, Ньютона и Гюйгенса, Томсона и Гольдштейна. А вот античастицы никто и никогда не предсказывал, ни в одном физическом исследовании нельзя встретить и намека на антимиры. Разве что в отдельных натурфилософских работах появлялись неопределенные идеи о непременном существовании противоположных начал, но это основывалось скорее всего на некотором обобщении опыта человеческих взаимоотношений, например, борьбы Добра и Зла и т. п.

Два других важнейших сюрприза со стороны космических лучей тесно взаимосвязаны между собой и в некотором смысле еще более поразительны, чем откры-

тие позитрона. Речь идет об обнаружении новых процессов — налетающая с огромной энергией космическая частица буквально взрывалась, сталкиваясь с одним из ядер вещества, генерируя множество следов, которые, в свою очередь, могли быть приписаны новым частицам, обладающим промежуточным значением массы между протоном и электроном.

Первые регистрации процессов множественного образования новых частиц, названных мезонами (дословно — срединными, промежуточными), стали отправным пунктом для того понимания центральной проблемы физики высоких энергий, которое сложилось в более или менее четкой форме лишь в настоящее время, примерно за последнее десятилетие.

В физику входило представление о новых чрезвычайно интенсивных силах, действующих между некоторыми элементарными частицами.

Необходимость в таких силах отчасти предугадана в процессе исследования атомных ядер. Уже в начале 20-х годов исследователи пришли к убеждению, что ни рассеяние на ядрах, ни сам факт их существования нельзя понять, если не предположить, что мы сталкиваемся с взаимодействиями, значительно сильней электромагнитных, но с чрезвычайно малым радиусом действия. Такая гипотеза сразу же позволяла качественно объяснить аномальное поведение альфа-частиц, пытавшихся проскочить в непосредственной близости от ядер, а также преодолеть очевидную трудность в ранних моделях самого ядра. Дело в том, что несколько протонов, образующих заряженный «остов» ядра, не могли быть устойчивой системой из-за огромных кулоновских сил отталкивания. Не могли, разумеется, если не существовало бы каких-то еще более мощных удерживающих, цементирующих их сил.

Более подробный рассказ о замечательном «ядерном клее» и интересных свойствах ядерно-активных частиц пойдет в последующих главах, там мы и обсудим не спеша обозначенные выше открытия. Здесь же мы отметим еще два полезных обстоятельства.

Во-первых, установление высокой активности космических пришельцев вдохнуло жизнь в едва уже не похороненную «с подобающими почестями» атмосферную гипотезу. Стало ясно, что, по крайней мере, часть попадающих в наземные установки частиц образуется не

в глубинах вселенной, а в земной атмосфере под действием первичного истинно космического излучения.

Во-вторых, среди мезонов обнаружились своеобразные «замаскированные» электроны. Слово «своеобразные» относится лишь к способу их маскировки — они обладают примерно в 207 раз большей массой, в остальном же они начисто лишены какого-либо своеобразия, и именно этот факт оказался едва ли не самой неприступной тайной микромира. Сначала новые частицы окрестили мю-мезонами, потом название немного сократили до «мюонов», вероятно, для того, чтобы отличать их от других, гораздо более активных собратьев по мезонному семейству. К этому времени дираковское удвоение миров было более или менее неплохо освоено теорией, но вот для чего понадобилось природе еще одно, причем персональное удвоение электронов — этого никто так и не знает. Мюоны намного тяжелее электронов, но во всех реакциях строго следуют тем же правилам поведения, которые пишутся для электронов. Достаточно лишь провести во всех электронных соотношениях замену масс, то есть буквально подставить другое число, и перед вами готовый свод мюонных законов.

Так возникла «мю-е-проблема»; под таким названием проводятся международные семинары, ставятся сверхточные эксперименты, выходят в свет десятки статей. А она практически в первозданном виде и остается все той же мю-е-проблемой...

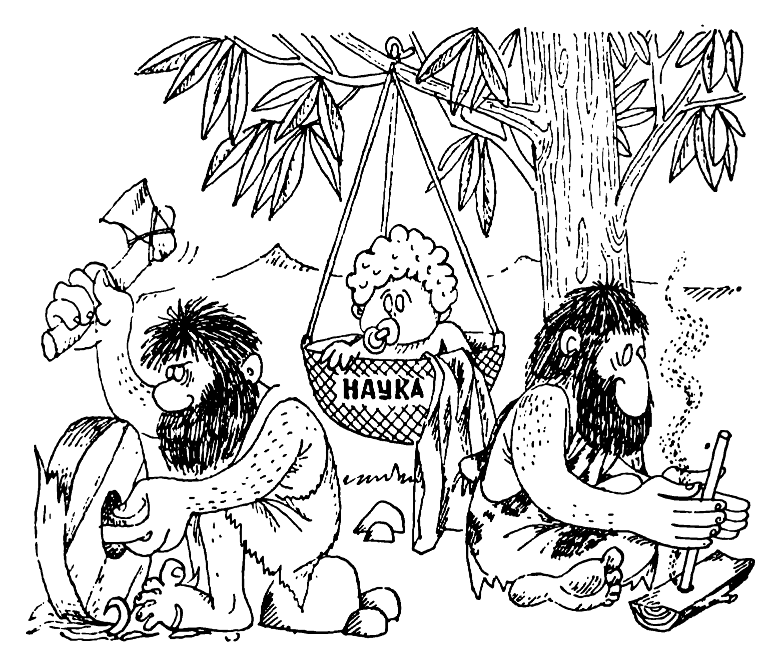
КЛЮЧИ К МИКРОМИРУ

За последние 80—100 лет произошел коренной перелом во взаимоотношениях науки и ее наиболее крупных технических приложений. Исчезает характерное для прежних времен стремление извлекать пользу из новых явлений, не постигая их сути.

Не следует, конечно, считать, что выдающийся практицизм наших далеких пращуров был следствием какой-то особой интеллектуальной близорукости, а дальновидные умники появились совсем недавно. Дело просто в темпе событий, который, как мы уже договорились, является основной приметой текущего за нашими окнами времени. Седая старина тем и характер-

на, что в подавляющем большинстве случаев рецепт, найденный сегодня, оказывался вполне пригодным для многих поколений, верным почти без малейших изменений. Успешно прослужив сто, двести, а иногда и тысячу лет, рецепт становился предметом поклонения, а не изучения. И спаси господь дерзкого человека, решившего посягнуть не то что на его опровержение, но даже на простое сомнение.

Но старые времена дают нам и множество примеров гениальных изобретений, намного опередивших уровень научного понимания мироустройства. Наука едва еще выкарабкивалась из пеленок, а техническая мысль вынуждена была волоком волочь упирающегося, перепуганного огромностью этого мира младенца к его же светлому будущему. Это они, так и не вышедшие из тени неизвестности, первопроходцы, нашли простые способы разжигания и хранения огня, — достижение, которое окончательно и бесповоротно поставило человека в господствующее положение в биосфере нашей планеты. И это величайшее открытие состоялось без самомалейшего понятия об окислительных реакциях.



Задолго до открытия элементарных законов механического движения по земле прокатилось первое колесо. Большие лодки стали бороздить моря и океаны за много веков до рождения Архимеда. Да уж бог с ней, с древностью. Первый паровоз побежал по рельсам, когда солидные ученые мужи еще превозносили теорию невидимой тепловой субстанции — флогистона... Уже в начале нашего века король изобретателей Т. Эдисон, похвалявшийся тем, что никогда не заглянул ни в одну теоретическую книгу, получает свой 1093-й (!!) патент на изобретение в области электротехники...

Но рядом уже развивается совсем иная деятельность. В 1895 году русский А. Попов и итальянец Г. Маркони демонстрируют удивительные приборы — первые радиоприемные устройства, в основе изобретения которых лежит не простой поиск методом перебора, а четкое представление о недавно открытых Г. Герцем электромагнитных волнах.

Ясно, что здесь мы сталкиваемся с качественно иной ситуацией. Попробуйте вообразить себе создание радиоприемника без предшествующих чисто научных исследований быстропеременных токов, без обнаружения особых волн, генерируемых колебательным контуром. И уж совсем мистическим актом воображения представляется, скажем, создание лазера без глубокого знания квантовой теории атомно-молекулярных систем.

Из этого вовсе не следует какое-либо преуменьшение роли поиска методом проб и ошибок. Между предсказанием большого выхода энергии в процессе деления ядра урана и созданием реального ядерного реактора — дистанция огромного размера. Но тут важна принципиальная сторона вопроса — без тщательного чисто научного анализа энергетики ядерных реакций, без теории «дефекта массы», основанной на эйнштейновской связи между энергией и массой, вряд ли мы были бы даже знакомы с такими словосочетаниями, как «ядерный реактор», «термоядерный реактор» и т. п.

Чисто рецептурная наука уходит в область преданий. Сегодня будущее наступает гораздо быстрей, чем в далекие времена. Аккумулировать опыт поколений в виде каких-то практических рецептов, попросту говоря, некогда — в тупике могут оказаться не столько

далекие потомки, сколько ныне здравствующие люди. Наука XX века стала активно продуцировать «заготовки впрок». Исследования, направленные на выяснение механизма явления, порождают новые исследования — процесс становится лавинообразным. Получается так, что по большинству стоящих перед обществом проблем ученые способны либо немедленно сформулировать конкретные практические рекомендации, либо указать ясные пути их выработки. И в этом важнейший источник высокого престижа естественных наук.

Но, возможно, самое любопытное состоит в том, что взрыв исследовательской активности буквально на наших глазах сметает глубоко укоренившееся представление о самой науке как о непоколебимом своде фундаментальных законов природы, огромном храме — хранилище неоспоримой истины. Эти, в общем-то, славные образы — типичное наследие старых добрых «медленных» времен, когда по одним и тем же учебникам превосходили премудрость десятки и десятки студенческих поколений, а научные статьи не успевали безнадежно устаревать еще до выхода в свет; когда ученые были скорее жрецами-добровольцами, а не научными сотрудниками с годовыми, пятилетними и перспективными двадцатилетними планами работы.

Прорыв в мир частиц высоких энергий связан с формированием науки нового типа. Физика высоких энергий дала первый образец сверхбыстрого развития и в постановке основных задач, и в методах организации исследований. Этот блестящий взлет произошел в удивительно короткий срок благодаря счастливому сочетанию двух, быть может, важнейших человеческих качеств — неиссякаемой изобретательности и умения жертвовать сиюминутными интересами ради Будущего с большой буквы. Именно это и позволило перейти к созданию самых-самых (больших, сложных, дорогостоящих...) приборов для изучения микромира — ускорителей заряженных частиц.

К концу 20-х — началу 30-х годов, когда помыслами физиков все сильней и сильней стали овладевать элементарные частицы и атомные ядра, выяснилось, что для серьезного движения вперед нужно срочно менять оружие. «Даровые» радиоактивные источники, которые верой и правдой служили науке много лет, не обеспечивали новых экспериментальных потребностей. Во-

первых, они давали частицы с энергией, строго регламентированной законами радиоактивного распада. Во-вторых, эта энергия была не особенно велика — в лучшем случае порядка 10 МэВ. Кроме того, по ряду соображений для исследования ядер было выгодно использовать не альфа-частицы, а протоны.

Перед тем как перейти на долгосрочную и плодотворную работу в химии, биологии, геофизике и других областях науки, буквально «под занавес» радиоактивные источники сыграли одну из лучших своих ролей. С их помощью в 1932 году Дж. Чэдвик открыл долгожданную нейтральную составляющую атомных ядер — нейтрон, предсказанную его учителем Э. Резерфордом. Это открытие завершило длинную серию работ по установлению природы странного излучения, которое возникало в результате бомбардировки бериллия альфа-частицами и обладало высокой проникающей способностью. Дж. Чэдвик доказал, что при захвате альфа-частицы ядром бериллия образуется ядро углерода и испускается нейтральная частица, которая входила в состав одного из сталкивающихся ядер.

Экспериментальное обнаружение нейтрона позволило разработать простейшую составную модель ядра, о которой мы уже упоминали, вызвать искусственное деление тяжелых ядер и, наконец, в 1942 году запустить первую действующую модель ядерного реактора. Именно в связи с этой впечатляющей цепочкой завоеваний 30-е годы стали скорее «ядерными», чем «элементарно-частичными». Если когда-нибудь благодарные физики-ядерщики пожелают поставить монумент в честь одного из объектов своих исследований, то, на мой взгляд, это должна быть модель ядра гелия — великой альфа-частицы. Еще бы! Открытие атомных ядер в резерфордовских экспериментах, расшифровка протон-нейтронной структуры ядра произошли с ее помощью. Альфа-радиоактивность открыла путь в ядерный мир!

В высшей степени символично, что 1932 год оказался моментом передачи эстафеты — блестящий нейтронный финиш радиоактивных источников и практически сразу же мощный позитронный старт космических лучей. Старт был действительно превосходным, но многоопытные тренеры уже понимали, какие дистанции доступны для космических бегунов, а какие нет.

Космические лучи представлялись идеальным инструментом исследований по двум соображениям: их получение не требовало ни малейших расходов, и они обладали фантастически широким спектром энергий. Зато работа с ними основывалась на не слишком приятном принципе «ждать у моря погоды» и требовала невероятного терпения. Космическая частица с нужной энергией могла попасть в регистрирующее устройство сегодня, завтра, через год. Предположим, что небеса все-таки «являли милость», но это было одно, два, от силы десяток-другой событий. Что с ними можно сделать? Можно увидеть следы «неведомых зверей» — открыть новые частицы, можно зафиксировать новый тип процессов; в общем, установить уникальные факты существования чего-либо. Но получить более детальную информацию о поведении той же самой вновь открытой частицы в различных реакциях и при различных энергиях оказывается чрезвычайно сложным и слишком длительным делом. Ведь необходимо набирать сотни тысяч событий. В этом плане космические лучи могли оказать лишь одну услугу — дать предварительный сигнал о каких-то новых закономерностях.

Именно такова их основная специальность в настоящее время; и надо отметить, что зарекомендовали они себя в этом деле с лучшей стороны. Если учесть, что сейчас в составе космических лучей зарегистрированы частицы с энергиями до 10^{21} электрон-вольт, а на ускорителях изучают реакции при энергиях частиц лишь до 10^{12} эВ, то становится ясно — им еще долго предстоит выполнять функции «стратегической разведки».

Все это неплохо — одним поставят памятник, другие уйдут в разведку. А кто же станет работать? Природа не позаботилась о достойной замене и не предложила ни одного естественного источника радиации, который помог бы обойти все наметившиеся трудности. Но физики уже представляли себе путь, по которому следовало двигаться, — частицы должны ускоряться электрическим полем; в принципе так же, как и при получении катодных лучей (электронов с большими скоростями). Только электроны ускорялись разностью потенциалов всего в несколько тысяч электрон-вольт, а теперь нужны миллионы. Следовательно, необходимо решать электротехнические проблемы с созданием высоковольтных установок...

Между этими ранними идеями и действующими установками лежат годы трудных поисков, великолепные находки и тягостные сомнения, радужные и пессимистические прогнозы.

1918 год. Петроград. Город борется за новую жизнь. Трудно с хлебом, трудно с работой, по ночам на вымерзших, пустынных улицах нет-нет и вспыхивают короткие ожесточенные перестрелки... Но и здесь, в центре великого социального потрясения, с невероятным напряжением сил идет битва за будущее русской науки, закладывается основа уверенного взлета. И одним из первых пунктов программы научного развития стала организация радиевого отделения при Радиологическом и рентгенологическом институте.

Огромную роль в создании нового отдела сыграл энтузиазм тридцатилетнего Л. Мысовского, который уже несколько лет успешно занимался проблемами новой физики. Фактически он был первым и едва ли не единственным физиком России, приступившим к исследованиям радиоактивности в дореволюционное время.

В начале 1922 года радиевое отделение преобразуется в знаменитый Радиевый институт, где были сконцентрированы работы с применением ядерных излучений в самых различных областях науки. Руководство физическим отделом этого института было поручено Л. Мысовскому. Летом этого же года он представил на заседание ученого совета доклад по своей совместной со студентом Петроградского электротехнического института В. Рукавишниковым работе, где была сформулирована идея использования генераторов высокого напряжения для ускорения альфа-частиц до нескольких миллионов электрон-вольт.

Практически в это же время Патентное ведомство США рассматривало оригинальную заявку, поступившую из штата Пенсильвания. В ней молодой сотрудник исследовательской лаборатории фирмы Вестингауз Дж. Слепян предлагал несколько иную конструкцию установки для ускорения заряженных частиц, так называемый индукционный ускоритель электронов.

Так общие идеи превратились в конкретные, осязаемые проекты. Но лишь последующее десятилетие перевело интересные предложения на язык действующих моделей. В 1929 году в Принстонском университете заработал первый электростатический генератор Р. Ван

де Граафа с ускоряющим напряжением до 80 тысяч вольт. Через два года на третьем варианте его установки было достигнуто напряжение в полтора миллиона вольт!

Еще через год английские физики Дж. Кокрофт и Э. Уолтон коротенькой заметкой в журнале «Нейче» («Природа») оповещают научную общественность о первой впечатляющей победе ускорительной эры. С помощью двухкаскадного генератора напряжения они создали пучок протонов с энергией 710 тысяч электрон-вольт и обстреляли литиевую мишень. В результате столкновения протона с ядром лития образовывались две энергичные альфа-частицы, то есть наблюдалась реакция расщепления ядра. Таким образом, искусственная радиоактивность была получена при помощи искусственных же источников быстрых частиц!

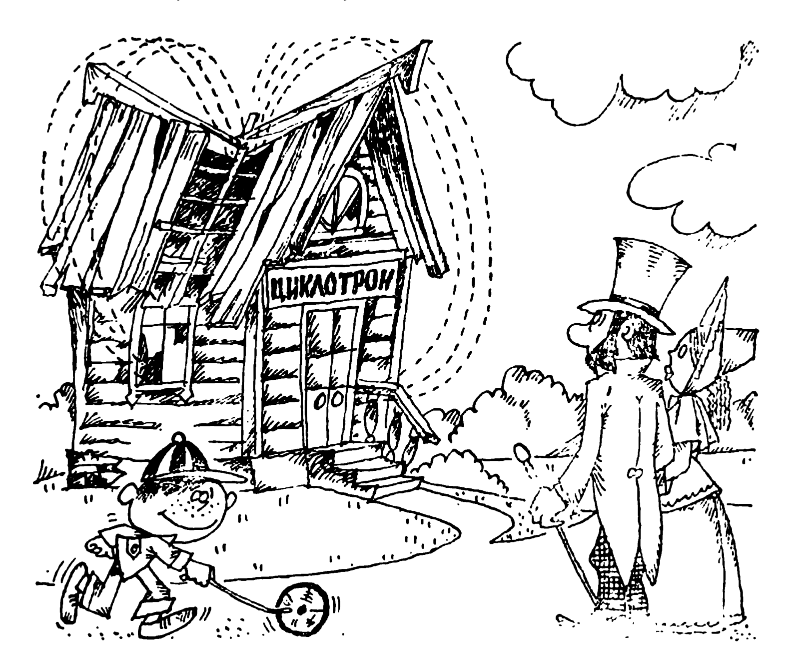
Вскоре был придуман совершенно иной, оригинальный принцип ускорения. В 1929 году двадцативосьмилетний адъюнкт-профессор Калифорнийского университета Э. Лоренс изобрел циклотрон — прибор, основанный на резонансном ускорении заряженных частиц высокочастотным полем, по справедливости считающийся родоначальником обширного семейства современных гигантских машин.

Несколько уточняя генеалогию ускорителей, нельзя не напомнить, что по современным масштабам предки рода гигантов были воистину карликами. Первая модель циклотрона имела диаметр магнитных полюсов 10 (!) сантиметров и представляла собой крайне нелепое сооружение из стеклянных пластинок, скрепленных сургучом. Но самое любопытное в том, что эта конструкция, хранящаяся ныне в Лондонском научном музее, все же работала — по мере «слабых своих возможностей» — и ускоряла ионы водорода. Спустя некоторое время Э. Лоренс получил в подарок от крупной телеграфной компании 74-тонный электромагнит, который более десяти лет провалялся у нее на складе (выбросить жалко, продать — никто не купит). Магнит разместили в старом деревянном доме вблизи университета и стали монтировать большой циклотрон. На фасаде появилась интригующая вывеска: «Радиационная лаборатория»; и все просвещенное население небольшого городка Беркли с нетерпением ожидало приобщения к ядерным «таинствам». Монтаж и запуск

ускорителя прошли вполне успешно, и в 1932 году физики получили хороший пучок протонов с энергией 3,6 миллиона электрон-вольт. Так произошло рождение замечательного прибора — циклотрона. А с небольшого деревянного дома начинался один из крупнейших в мире центров ядерных исследований — Берклиевская радиационная лаборатория имени Э. Лоренса.

Принцип действия лоренсовского ускорителя довольно прост и в основных чертах используется в последующих проектах, включая самые современные. Заряженные частицы нужно гонять по кругу, периодически подхлестывая высокочастотным электрическим полем так, чтобы в каждом цикле они приобретали дополнительный импульс. А удерживать их на круговой траектории должно особое магнитное поле, причем чем сильней действует магнит, тем меньше радиус окружности, по которой несутся частицы.

Но возможности проникновения в область миллиардов электрон-вольт с помощью такого циклотрона оказались закрытыми. На пути замечательной идеи стояли основные принципы теории относительности. Чем боль-



ше скорость частицы, тем больше ее масса, и этот рост массы разрушает цикличность процесса — поле начинает не вовремя подстегивать отяжелевшие частицы.

Выход из трудного положения был найден только в 1944 году советским физиком В. Векслером. Раз массы ускоряемых частиц растут, рассуждал он, значит, для сохранения их «нормальных отношений» с полями последние должны также меняться синхронным образом. При этом можно идти одним из двух путей: либо менять частоту электрического поля, либо — интенсивность магнитного. Выбор пути предоставлялся экспериментаторам и конструкторам.

Метод Векслера получил название автофазировки. Соответственно ускорители, где подстраивается частота электрического поля, стали называться красивым «высоконаучным» словом синхрофазотрон, а те, в которых нарастает магнитное поле, — немного короче: синхротрон. Как это нередко случается, краткость оказалась родной сестрой таланта — именно синхротроны обеспечили прорыв к самым высоким из достигнутых энергий.

В 1957 году в Дубне вступил в строй самый крупный в мире синхрофазотрон, разгоняющий протоны до энергии 10 гигаэлектрон-вольт. На этой машине физики Объединенного института ядерных исследований — крупнейшей международной организации, объединяющей усилия ученых социалистических стран, — выполнили ряд важных работ в ранее недоступном диапазоне энергий.

С той поры прошло немало лет. За это время свершилось множество замечательных событий. Энергии, полученные на ускорителях, возросли в 40(!) раз. В 1967 году, словно отмечая юбилейное десятилетие дубненского ускорителя, заработал синхротрон Института физики высоких энергий в небольшом лесном поселке на берегу Протвы, вблизи старинного русского города Серпухова. А уже через пять лет неподалеку от Чикаго, в Батавии, вошел в строй еще более мощный ускоритель.

На серпуховской машине была достигнута рекордная для своего времени энергия протонов — 76 гигаэлектрон-вольт. В 1972 году на батавийском синхротроне был поставлен новый «мировой рекорд»—после многих переживаний и даже крупного срыва удалось получить 200-гэвный пучок протонов. Трудное начало словно под-

хлестнуло американских физиков. К настоящему времени в Национальной ускорительной лаборатории имени Э. Ферми — так стал официально именоваться батавийский центр — достигнут рубеж в 400 ГэВ, и, по-видимому, когда вы будете читать эти строки, в научных журналах появятся первые сообщения о результатах экспериментов при 500 ГэВ.

Замечательных успехов добились и в Европейском центре ядерных исследований, ЦЕРНе (так звучит сокращенное название этого центра, составленное из начальных букв французского выражения). Часть пучка «старого» ускорителя на 30 ГэВ, расположенного вблизи Женевского озера в Швейцарии, отводилась в специально построенное накопительное кольцо, а потом устраивалось почти лобовое столкновение основного и накопленного пучков. Благодаря этому физики смогли заглянуть в мир процессов, которые при использовании обычной неподвижной мишени могли бы наблюдаться только при 2000 ГэВ!

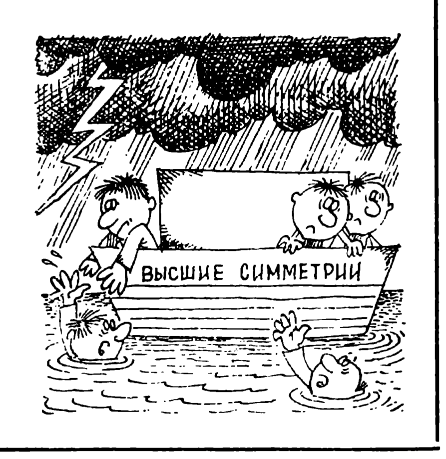
Мы не станем теперь по традиции останавливаться на главных итогах прорыва в мир высоких энергий — этому посвящены следующие главы книги. Отметим лишь следующее.

Появление мощных ускорителей сделало протоны основным инструментом исследований микромира, и в то же время они сами стали наиболее доступным предметом изучения. Поэтому не следует удивляться, что на передний план современной физики высоких энергий выдвинулись определяющие свойства этой замечательной частицы, прежде всего ее способность сильно взаимодействовать с веществом. Следующий этап развития физики элементарных частиц представляет собой преимущественно «адронную эру», которая пришла на смену «электронно-радиационной эре».

Советский физик, член-корреспондент Академии наук СССР Л. Окунь назвал *адронами* (от греческого «хадрос» — тяжелый) семейство сильновзаимодействующих элементарных частиц, в основном потому, что они обладают большими массами. Впрочем, адроны оправдали свое название и в ином отношении — их описание оказалось, пожалуй, весьма тяжелой проблемой даже для закаленной в электронных, квантовых, релятивистских и многих других сражениях, неустрашимой физики XX века...

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ,

ПОВЕСТВУЮЩАЯ О ПОТОПЕ ОТКРЫТИЙ И СПОСОБАХ НАСКОРО СООРУДИТЬ КОМФОРТАБЕЛЬНЫЙ КОВЧЕГ



Кстати, о призраках... На днях я с огромным интересом прочел книгу одного ученого-психиатра «Записки о встречах с призраками». По этой книжке выходит, что призраки поддаются довольно точному определению.

К. Абэ

СЧАСТЛИВЫЕ „ДОПОТОПНЫЕ ВРЕМЕНА"

Тридцатые годы. Время великих свершений и иллюзий... Посудите сами. Устройство микромира постепенно выстраивалось в не столь уж сложную систему. Есть фотоны, и есть электроны. С помощью фотонов осуществляется взаимодействие между электронами и любыми другими электрическими зарядами. Электроны вместе с ядрами формируют атомы. Ядра состоят из протонов и нейтронов. Все пригоже и целесообразно — ничего лишнего. Правда, имеются две нерешенные задачки — явные пробелы в общей картине.

Первая из них восходит к 1914 году, когда Дж. Чэдвик (будущий открыватель нейтрона) обнаружил странное свойство бета-радиоактивности. Быстрые бета-электроны явно испускались из атомного ядра в результате какого-то внутриядерного катаклизма. Но вместо того, чтобы нести одну постоянную и строго определенную

энергию, они создавали целый спектр, притом довольно широкий.

Если бета-электроны с таким непрерывным спектром вылетали непосредственно из ядер, возникала явная энергетическая катастрофа — в каждом акте испускания частицы обладали различными значениями энергии. Н. Бор со свойственной ему смелостью выдвинул гипотезу, что в этих конкретных актах энергия не сохраняется, а закон сохранения следует относить только к среднему значению энергии электрона. Простой путь к спасению великого закона указала немка Л. Мейтнер. В 1922 году она высказала предположение, что электроны «размазываются» по широкому энергетическому интервалу из-за вторичных соударений. Однако к концу 20-х годов ее гипотеза была опровергнута экспериментально.

И все-таки спасение закона сохранения энергии пришло. Пришло в виде письма, которое адресовал участникам небольшой конференции в Тюбингене в декабре 1930 года молодой В. Паули.

В послании из Цюриха выдвигалась гипотеза, будто вместе с бета-электроном ядро испускает новую частицу с очень малой массой и высокой проникающей способностью, причем суммарная энергия бета-электрона и новой частицы остается постоянной, то есть строго сохраняется в каждом акте. В. Паули окрестил «спасителя» нейтроном. Это тяжеловесное название продержалось недолго — лишь до открытия Дж. Чэдвиком настоящего, полноправного нейтрона.

Новая частица понравилась многим, но особые симпатии к ней стал испытывать молодой итальянский физик Э. Ферми. По его предложению она стала называться нейтрино (по-итальянски: нейтрончик), и конфликт между достойными партнерами по ядерному миру был ликвидирован. В 1933 году Э. Ферми построил первую теорию испускания бета-электронов, которая сыграла исключительную роль в развитии представлений о микромире.

Прежде всего в ней была впервые четко зафиксирована идея о том, что в атомном ядре содержатся только протоны и нейтроны, а бета-электроны образуются лишь в результате реакции распада нейтрона. Тем самым было защищено наиболее уязвимое место в протон-нейтронной гипотезе о строении ядра, которая была вы-

двинута в работах В. Гейзенберга, советского физика-теоретика Д. Иваненко и итальянца Э. Майорана. Эта гипотеза появилась вслед за открытием нейтрона, но некоторое время физики думали, что в ядре наряду с протонами и нейтронами все-таки должны содержаться электроны — те, которые испускаются в виде бета-излучения. Во-вторых, теория Э. Ферми сделала гипотезу В. Паули выдающимся примером предоткрытия. Между предсказанием и прямой регистрацией нейтрино прошло около 35 лет, и некоторые вполне естественные сомнения, возникавшие за столь долгий срок, не идут ни в какое сравнение с редчайшим обстоятельством — на шатком, казалось бы, фундаменте гипотетического нейтрино вырос целый раздел физики элементарных частиц. И именно в этом главная заслуга работы Э. Ферми, где впервые было показано, что бета-радиоактивность обусловлена новыми особыми силами, которые значительно слабее электромагнитных. Благодаря *слабому взаимодействию* нейтрон превращается в протон, испуская одновременно электрон и *антинейтрино*.

Эта идея была в значительной степени основана на аналогии с квантовой электродинамикой, которая трактовала взаимодействие как испускание или поглощение фотона электрическими зарядами.

В теории Э. Ферми вместо электрических рассматривались особые «слабые заряды», а аналогом фотона стали пары электрон — нейтрино.

В том, что решающий эксперимент по обнаружению новой частицы произошел не скоро, «виноваты» сами нейтрино, точнее, их фантастическая проникающая способность. Оценка, которой пользовался В. Паули в своем знаменитом письме в Тюбинген, означала, что нейтрино должно свободно прошивать примерно 10-сантиметровую свинцовую пластинку. Впоследствии он любил приводить такой наглядный пример: нейтрино может «не заметить» и свинцовой стены толщиной в 100 световых лет.

Пример, конечно, не столько наглядный, сколько сногсшибательный. Посудите сами: световой год — это расстояние, которое способен пройти свет в пустоте за один земной год. Скорость света составляет примерно $3 \cdot 10^{10}$ сантиметров в секунду, а год длится $3{,}16 \cdot 10^7$ секунд (кстати, удобнейшая приближенная формула для запоминания: $\pi \cdot 10^7$ секунд, где π — обычное школь-

ное «пи»!), то есть один световой год равен 10^{18} сантиметров, а 100 световых лет соответственно равны 10^{20} сантиметров. Это на 10(!) порядков превышает радиус Солнца и примерно в три раза радиус ядра нашей Галактики. Отсюда ясно, по крайней мере, одно: нейтрино способно приносить информацию из таких уголков вселенной, откуда ни одна другая частица не выберется «живьем».

Разумеется, о проникающей способности говорят лишь в среднем, то есть каждое отдельное нейтрино может застрять в первом же миллиметре вашего письменного стола, а может и проскочить всю вселенную. Просто оба эти события маловероятны. Рассуждая о гигантской космической преграде, имеют в виду, что вероятность застревания нейтрино при наличии более толстой преграды, скажем, свинцовой стены толщиной более 100 световых лет, весьма велика. В общем, здесь все происходит по правилам квантовой механики: запустив на какую-либо мишень достаточно интенсивный пучок нейтрино, мы вскоре обнаружим редкие события его столкновений с частицами вещества. Но именно в этом и скрывались основные трудности в постановке решающего опыта — нужен был действительно мощный поток нейтрино.

Необходимый поток антиподов нейтрино — антинейтрино достигался на некоторых ядерных реакторах, и благодаря этому американские физики сумели зарегистрировать реакцию такого типа: антинейтрино налетает на протон, они взаимодействуют, и в результате возникают нейтрон и позитрон. Это открытие состоялось в 1956 году. В 1962 году был обнаружен другой тип нейтрино, так называемое мюонное нейтрино, возникающее при распаде уже встречавшегося нам мю-мезона. Таким образом, «дублер» появляется не только у электрона (мюон!), но и у электронного нейтрино (мюонное нейтрино).

А теперь обсудим вторую нерешенную задачку, где в ответе появится пи-мезон — частица с едва ли не прямо противоположными свойствами, для которой буквально каждый сантиметр вещества таит смертельную опасность. Эта задачка возникла в связи с уже упоминавшейся неприятностью — в красивой картине протон-нейтронной модели ядра не хватало одной «мелкой детали» — неясно было, что же удерживает рядом прото-

ны и нейтроны, почему одноименно заряженные протоны не разлетаются в разные стороны.

В разрешении данной загадки значительную роль сыграла небольшая заметка советского физика-теоретика И. Тамма, опубликованная в журнале «Нэйче» («Природа») в 1934 году. Он предположил, что силы, действующие между протонами и нейтронами, обусловлены обменом парами квантов электронного и нейтринного полей. Эта идея следовала из аналогии с картиной взаимодействия электрических зарядов, например, электронов, которые обменивались между собой фотоном. По замыслу И. Тамма, электрон-нейтринные пары должны были «замещать» фотоны в задаче о взаимодействии протонов и нейтронов. Разумеется, теперь речь шла не об электрических, а о каких-то особых «ядерных зарядах». Силу взаимодействия между протонами и нейтронами можно было оценить непосредственно, исходя из теории Ферми, по той интенсивности, с которой нейтрон испускает электрон и антинейтрино, превращаясь при этом в протон. Но оказалось, что такое взаимодействие слишком слабо для поддержания стабильно-



сти атомных ядер! Однако идея И. Тамма проложила дорогу решению проблемы ядерных сил. Физикам стало ясно, что непосредственно применять готовые модели электромагнитных или слабых взаимодействий нельзя, — соответствующие силы просто не смогут склеить протоны и нейтроны в ядре. Но в ограниченном виде аналогия с электродинамикой — там, где речь шла о некоторых обменных частицах — была вовсе не плоха. Именно из этого исходил двадцативосьмилетний физик-теоретик из Осакского университета Х. Юкава, приступая к анализу природы новых сил, действующих в ядре.

В 1935 году появилась его знаменитая статья, где была сформулирована гипотеза о существовании новых частиц — переносчиков взаимодействия между протонами и нейтронами, — квантах некоторого особого ядерного поля, наподобие фотонов, которые, как вы помните, являются квантами электромагнитного поля. Основываясь на известных ему оценках радиуса действия ядерных сил, Х. Юкава рассчитал массу такой частицы; она должна была примерно в 200 раз превышать массу электрона. Величину «ядерного заряда» теперь уже можно было выбирать, не ограничиваясь теорией Ферми, а опираясь непосредственно на экспериментальные данные по взаимодействию протонов и нейтронов. Оказалось, что силы, действующие между ними, примерно в тысячу раз интенсивней электромагнитных. В результате получилась весьма неплохая модель устройства ядра, но, как это нередко встречается, сам автор воспринял ее излишне пессимистически — в конце статьи он указал, что придуманная им теория, по-видимому, неверна, поскольку... придуманную им частицу никто экспериментально не обнаруживал.

А судьба гипотезы о юкавских переносчиках взаимодействия между протонами и нейтронами, этих тяжелых квантах ядерного взаимодействия, оказалась и впрямь не очень простой. Начать с того, что уже в 1934 году первооткрыватель позитрона Ч. Андерсон со своим сотрудником С. Неддермейером обнаружили, что некоторые следы в камере Вильсона соответствуют частицам со значениями масс много больше электронной и много меньше протонной. Но Х. Юкава ничего не знал об этих результатах! Официальное «открытие» новых частиц состоялось только в 1937 году, когда в одном и том же томе американского журнала «Физикал

ревью» («Физическое обозрение») появились сообщения сразу двух групп, изучавших следы космических лучей. Юкавское значение массы оправдывалось с поразительной точностью!

Эти работы явились вполне достойным «открытием» новых объектов — мезонов, а кавычки для слова «открытие» использованы по той простой причине, что «американские мезоны» не имели непосредственного отношения к «японским предсказаниям» — это были уже упоминавшиеся мю-мезоны, дублеры электрона по микромиру. Впрочем, первоначально никаких особых подозрений в несоответствии предсказанных и открытых частиц не возникало. Лишь постепенно, в течение десяти лет, выяснилось, что такие частицы не обладают ядерной активностью и взаимодействуют с ядрами только благодаря наличию электрических зарядов.

Такие неприятные неувязки были окончательно осознаны к 1947 году, и не исключено, что в судьбе гипотетических тяжелых квантов Юкавы произошли бы трагические события, если бы... они не были именно в этом году открыты «всамделишно».

Особо важную роль в благополучном исходе поисков сыграли новые, чрезвычайно чувствительные фотопластинки, вовремя попавшие в руки к исследователям космических лучей. Благодаря чудо-пластинкам группа С. Пауэлла обнаружила, что наряду с мю-мезонами появляется некоторое количество частиц с близким значением массы, но способных к расщеплению атомных ядер. Так юкавские кванты, названные в отличие от мю-мезонов *пи-мезонами*, получили права полноправных граждан микромира. Не остались в тени и их открыватели: Х. Юкава был удостоен Нобелевской премии в 1949 году, а С. Пауэлл ровно через год.

Теперь, я думаю, ясно, почему примерно к 1937 году — отчасти по «святому неведению», отчасти по «стремлению к покою душевному» — у физиков создалось довольно радужное настроение по поводу того, как же лепо и пригоже устроен этот микромир. Все при деле, и все на своих местах. Две новые частицы — мезон и нейтрино — вполне оправдывают свое существование: с ними в физику вошло представление о двух новых типах взаимодействия — *слабом* и *сильном*. Похоже было, что экспериментаторы выполнили свой долг наилучшим образом. Теперь дело за теоретиками, за созда-

нием хорошей количественной теории наблюдаемых явлений.

К моменту, когда настоящий юкавский квант — пи-мезон — обнаружился в составе космических лучей, а еще через год был зарегистрирован на циклотроне Берклиевской радиационной лаборатории, могло сложиться впечатление, что все главные действующие лица микромира уже найдены. Но вот тут-то на горизонте и замаячили крупные неурядицы.

Житейская мудрость предлагает по поводу таких ситуаций внешне парадоксальную поговорку: когда слишком хорошо — значит, плохо! В данном случае все оказалось не то чтобы «плоше», но сложней и интересней.

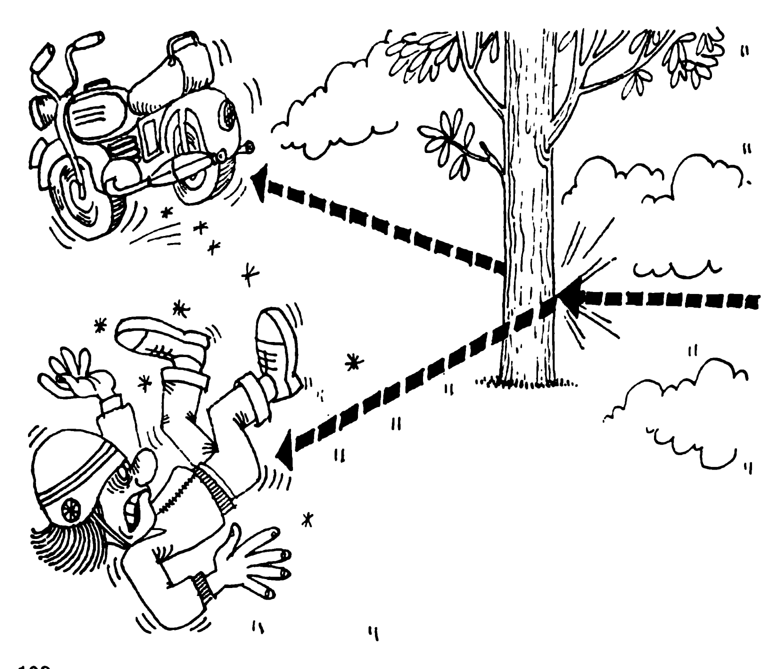
Уже в 1944 году французские физики Л. Ле-Принс Ренгуэ и М. Лэритье зарегистрировали любопытный след космической частицы, обладающей массой порядка 500 МэВ. Через три года сотрудники Манчестерского университета Дж. Рочестер и Ч. Батлер обнаружили два события: какие-то частицы распадались на лету и возникала своеобразная вилка следов, напоминающая по форме латинскую букву V. Начались интенсивные поиски новых событий такого же типа, а вскоре стало ясно, что открыт целый новый класс, точнее, даже два класса элементарных частиц, и первоначально их так и назвали: V-частицы. Некоторые из них оказались массивней протона, а другие — легче его; и эти, более легкие, явно принадлежали к мезонам.

V-частицы вели себя довольно странно — они рождались с большой интенсивностью в результате сильных взаимодействий, а распадались на пи-мезоны и протоны или только на пи-мезоны (опять-таки на сильновзаимодействующие частицы — адроны!) с гораздо меньшей интенсивностью. Получалось так, что рождением и распадом V-частиц «управляют» различные силы, и распад происходит в результате слабых взаимодействий. В этом-то и состояло противоречие с известными законами физики: раз частицы способны участвовать в сильных взаимодействиях, то и распадаться на адроны они должны были бы за счет тех же сильных взаимодействий! Поскольку этого не наблюдалось, физики предположили, что рождение V-частиц происходит несколько необычным образом — они действительно образуются в процессах сильных взаимодействий, но лишь в строго определенных комбинациях, скажем, попарно, а распадаются пооди-

ночке и уже за счет слабых взаимодействий. Впоследствии именно это свойство V-частиц — рождаться в строго определенных комбинациях — было подтверждено экспериментами и расценено как странная черта в их поведении. Например, у пи-мезонов аналогичной странности не наблюдалось — они рождались тоже с гораздо большей интенсивностью, чем распадались, но ведь распадались-то пи-мезоны не на адроны, а на частицы, не участвующие в сильных взаимодействиях!

Летом 1953 года во французском городке Банье-де-Бигор была созвана конференция по физике космических лучей. Она имела вполне определенную цель — навести порядок в семействе недавно открытых частиц, дать конкретные рекомендации для составления подробной таблицы элементарных «кирпичиков мироздания».

Конечно, новое всегда интересно и притягательно, но физики могли с легким налетом грусти отметить — частиц стало много, слишком много, чтобы все они в равной мере оставались настоящими «кирпичиками». Вероятно, создавшееся в связи с этим элегическое настроение способствовало одобрению прилагательного «странные»



в качестве определения (официального обозначения!) тех частиц, которые вели себя своенравно, и заставляли ученых искать какие-то необычные правила реакций. «Странные» мезоны были названы ка-мезонами, а «странные» частицы тяжелее протона и нейтрона — гиперонами. Протон, нейтрон и гипероны получили также и общее название — барионы (от «барос» — тяжелый).

В 1960 году на Международной конференции по физике высоких энергий демонстрировалась подробная таблица элементарных частиц и их основных свойств. Она занимала целую страницу стандартного книжного формата и включала целых 30 частиц и античастиц!

Первым, в гордом одиночестве стоял герой квантовых сражений фотон. Далее выделился особый класс лептонов (от «лептос» — легкий), куда вошли электрон, мюон, нейтрино и их античастицы. Из ядерно-активных частиц были известны 3 пи-мезона и 4 ка-мезона, а также протон, нейтрон, их античастицы и 6 гиперонов (один лямбда-гиперон, 3 сигма-гиперона и 2 кси) со своими антигиперонами.

Вот какая сложная «зоология» была наведена в микромире около 20 лет назад.

Запомнить такую «огромную» таблицу было намного сложней, чем две-три частицы «старых добрых времен».

Казалось, что конец 40-х и 50-е годы принесли настоящее половодье открытий — 20 новых частиц: мезонов и гиперонов, да еще и нейтрино. 23 из 30 частиц в приведенной таблице были ядерно-активны, причем 16 мезонов и гиперонов считались «странными». Следовательно, сильные взаимодействия обладают гораздо более сложными и разнообразными свойствами, чем могли себе вообразить физики в «ядерные» 30-е годы.

Между тем размышления о половодье возникли буквально накануне настоящего потопа, причем первые сигналы о надвигающейся «каре за иллюзии» физики в некотором смысле прозевали...

АДРОННЫЙ ПОТОП

«...В шестисотый год жизни Ноевой, во второй месяц, в семнадцатый день месяца, в сей день разверзлись все источники великой бездны и окна небесные отворились.

И лился на землю дождь сорок дней и сорок ночей...» Таковы строки библейской сказки о «наказании господнем», ниспосланном за грехи рода человеческого. Как известно, спасется лишь Ной — человек праведный и за то вовремя осененный предупреждением свыше. Он построит громадный ковчег, соберет на нем «всякой твари по паре» и причалит на нем к единственному кусочку незатопленной тверди земной — вершине горы Арарат.

Сказка сказкой, но нечто подобное произошло и в микромире: был и потоп открытий, и спасительный ковчег...

Масштабы событий, нахлынувших вскоре на физику элементарных частиц, действительно огромны, и их источники хорошо известны.

Ускорители дождались наконец своего часа. Уже к концу 40-х годов их возможности намного превзошли мечты создателей. Правда, хотя эпоха естественных радиоактивных снарядов ушла в прошлое, принципиальные результаты работ на ускорителях все еще плелись в хвосте у достижений физики космических лучей. Благодаря огромному энергетическому диапазону «дара небес» они позволяли широким фронтом вести поиск всевозможных необычных событий. Поэтому к моменту заполнения 30-частичной таблицы космические лучи оказались в положении фаворита.

Посудите сами, электрон и фотон были открыты с помощью катодных трубок; нейтрон и протон — с помощью радиоактивных элементов; нейтрино открыли, используя ядерный реактор. А вот мю-мезон, пи-мезоны, ка-мезоны, большинство гиперонов обязаны своим появлением исследованиям «космиков» (так называют среди физиков тех, кто занимается космическими лучами). Что могли показать на этой выставке достижений ускорители? Подтверждения результатов, добытых космиками? Но подтверждение, несмотря на всю полезность поговорки «повторение — мать учения», остается всего лишь движением по проторенному пути.

Неужели ускорители были обречены пожизненно на вторые роли?

Разумеется, нет! Просто они не могли конкурировать с космическими лучами в той области, где были (до поры, до времени!) заведомо слабее. Зато в систематическом изучении механизмов различных реакций ускорители имели уже к началу 50-х годов неоспоримое преиму-

щество. Ведь за несколько часов работы лабораторной установки можно было набрать тысячи и тысячи событий с интересующими экспериментаторов характеристиками. В процессе таких исследований и выяснилось, что таблица элементарных частиц, построенная главным образом благодаря даровым источникам, не то что неполна, но составляет на самом деле лишь малую часть настоящей таблицы.

Первые шаги на этом пути выглядели просто и скромно.

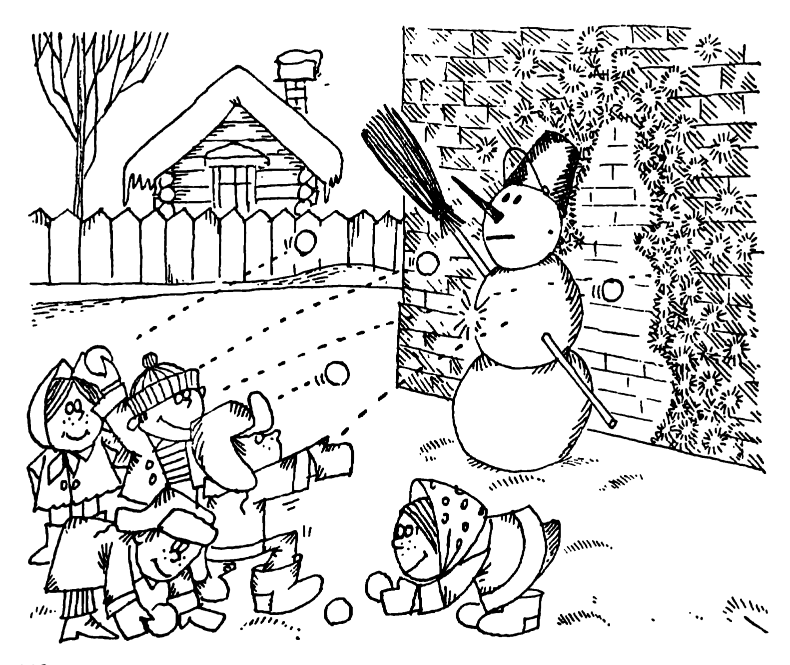
Весной 1951 года в Институте ядерных исследований при Чикагском университете был запущен синхроциклотрон с энергией протонного пучка 450 миллионов электрон-вольт. С помощью этого прибора группа Э. Ферми приступила к исследованию взаимодействия пи-мезонов с протонами. Пи-мезоны получались в результате бомбардировки медных и бериллиевых мишеней, после чего пучки положительно и отрицательно заряженных «ядерных квантов» выводились по отдельности на специальную мишень из жидкого водорода. Далее, измерялось ослабление пи-мезонных пучков: сцинтилляционные счетчики регистрировали количество налетающих на мишень частиц, а также число частиц, прошедших камеру-мишень без взаимодействия, и вычислялось отношение этих величин для камеры, заполненной водородом, и камеры пустой. Разность отношений в двух указанных ситуациях и определяла искомое ослабление.

Интуитивно ясно, что ослабление пучка зависит не только от силы взаимодействия пи-мезонов с протонами (ядрами атомов водорода), но и от плотности мишени. Поэтому для получения объективной характеристики самого взаимодействия необходимо выражать результаты измерений в форме, не зависящей от плотности. С этой целью обычно вводится удобная величина — поперечное сечение взаимодействия, — измеряемая в единицах площади. Ее наглядный, хотя и несколько приближенный, смысл состоит в следующем: налетающая частица «видит перед собой» преграду, площадь которой и есть поперечное сечение; или по-другому: если укрепить монету перед стенкой и направить на стенку луч фонаря, то возникающая теневая картинка полностью определяется площадью поверхности монеты, и говорят, что сечение рассеяния света равно по порядку величины этой площади.

Измеряя сечение рассеяния положительных пи-мезонов на протонах, Э. Ферми и его сотрудники обратили внимание на странную закономерность: в интервале энергии пионов (так сокращенно называют пи-мезоны) от 56 до 136 МэВ сечение возрастало примерно в 15 раз, то есть вероятность взаимодействия становилась очень большой.

Буквально в тот же день, когда столь сильный рост был окончательно установлен, Э. Ферми ознакомился с текстом еще не опубликованной статьи молодого теоретика К. Бракнера. В этой статье высказывалось предположение, что в пион-протонном рассеянии может возникать своеобразный резонансный эффект — то есть подавляющая часть событий может происходить с образованием некоторого промежуточного состояния. Слова «подавляющая часть» означают, что некоторое промежуточное состояние образуется с очень большой вероятностью.

В своей статье, содержащей описание этих экспериментов, Э. Ферми отмечает, что природа «промежуточного состояния» неясна, а энергии Чикагского ускори-



теля слишком малы для изучения эффекта в более широком интервале. Между тем он и его сотрудники впервые наблюдали проявление совершенно новых «героев микромира» — резонансов.

Для понимания природы резонансов потребовалось еще примерно 8 лет интенсивных исследований в значительно более широком интервале энергий и с гораздо лучшей теоретической «вооруженностью». Но Э. Ферми уже не сумел разделить радость вступления в новую резонансно-адронную эру — 29 ноября 1954 года его не стало. А через три дня Комиссия по атомной энергии США наградила посмертно его — президента Американского физического общества, лауреата Нобелевской и многих других премий, члена ряда иностранных академий — еще одной премией, носящей его имя.

Открытие резонансного эффекта в пион-протонном рассеянии оказалось последней крупной экспериментальной работой Э. Ферми. Дальнейшая история прорыва в новую область микромира тесно связана с поисками более общей картины сильных взаимодействий, чем можно было получить в рамках юкавской модели. В сущности, основная идея Х. Юкавы не отбрасывалась — барионы должны были по-прежнему взаимодействовать посредством мезонного обмена, но теперь уже речь шла о совершенно иных мезонах с несколько необычными свойствами.

К 1960 году различные гипотезы оформились в виде довольно ясного предсказания — следует искать новые частицы, способные распадаться на два или на три пиона. И в 1961 году почти одновременно были открыты ро- и омега-резонансы, которые вполне соответствовали бы предсказанным частицам, если бы... не отличались от обычных мезонов весьма забавным образом. Своенравие «ро» и «омега» состояло в том, что они принципиально не желали оставлять макроскопических следов.

Вот ведь какое дело! Представить себе существование обычной элементарной частицы не так-то просто: глаз или прибор регистрируют только достаточно масштабное явление среди атомов и молекул, вызванное «нарушителем спокойствия». А в данном случае никакого явления не видно, и резонанс приходится вычислять. Ни в одной лаборатории мира вам не покажут фотографии с красивым переплетением линий, где бы просматривался след

нового объекта — ро- или омега-резонанса. И тем не менее современная таблица элементарных частиц насчитывает более двухсот «главных взаимодействующих лиц», причем львиная доля приходится на эти самые резонансы. В чем же дело, нет ли тут каких-то неувязок? Можно ли ставить «невидимки» в один ряд с ранее известными частицами?

Прежде всего следует выяснить, не существует ли уважительной причины столь неуважительного отношения резонансов к традициям физической лаборатории. Среди частиц имеются различия не только по массам, но и по временам жизни. Из известных частиц абсолютно стабильны только четыре — фотон, нейтрино, электрон и протон, которые в вакууме могут существовать сколь угодно долго. Остальные хозяева микромира — все мезоны и барионы, начиная с нейтрона, — в вакууме непременно распадаются. Время жизни нестабильных частиц весьма различно: например, у нейтрона оно превышает 15 минут, а заряженные пи-мезоны живут всего $2{,}6 \cdot 10^{-8}$ секунды. Конечно, по нашим масштабам это невероятно маленький срок, но за такое время, двигаясь с околосветовой скоростью, пион успевает пролететь около 7,5 метра, то есть вполне достаточно для обычного фотографирования его в довольно большой камере. В этом смысле процесс распада можно считать медленным, происходящим как реакция со слабым взаимодействием.

Чем слабей взаимодействие, вызывающее распад, тем медленнее он происходит. Как мы помним, квантовая теория позволяет рассчитывать лишь вероятностные характеристики процессов. В данном случае обычно вычисляется вероятность перехода (например, пи-мезона в мюон и нейтрино) в единицу времени, а собственно временем жизни называется величина, обратная вероятности перехода. Понятно, что за счет слабых взаимодействий вероятности перехода получаются существенно меньшие, а следовательно, и время жизни таких частиц большее. Скажем, родной брат заряженных пионов — пи-ноль-мезон — может распадаться на два фотона только за счет электромагнитных взаимодействий, которые намного «сильнее слабых», и поэтому он живет недолго, в среднем $0{,}8 \cdot 10^{-16}$ секунды.

Но по сравнению с резонансами и пи-ноль-мезон великий долгожитель. Если мы договоримся принять его краткий срок существования, его век жизни, за год, то в

таком «микрокалендаре» резонанс живет всего несколько секунд, тогда как, например, мюон — около 20 миллиардов лет (примерно столько, сколько существует наблюдаемый участок вселенной в обычных годах)! В нормальной же шкале «ро» имеет время жизни порядка 10^{-23} секунды, и мюон — $2{,}2 \cdot 10^{-6}$ секунды, то есть резонанс должен распадаться на пионы за счет сильных взаимодействий. В этом его основная особенность. За столь малое время «ро» успевает пройти лишь микроскопическое расстояние порядка 10^{-13} сантиметра и, разумеется, не успевает оставить заметный макроскопический след. Поэтому его появление регистрируется не обычным путем, а особым образом.

Поскольку «ро» распадается на пару пионов, которые можно наблюдать непосредственно, то в какой-нибудь из реакций отбирают все события с рождением двух пи-мезонов и строят своеобразный график распределения по их суммарной массе. В этом распределении при массе примерно 773 МэВ должен наблюдаться максимум — горб кривой, — то есть основная часть событий концентрируется вблизи указанного значения. Однако распределение оказывается довольно широким — основание полученного «горба» составляет примерно 152 МэВ. Получив эти данные (для этого необходимо обработать сотни и сотни фотографий, содержащих пионные следы!), можно сделать вывод о том, что реакция образования пары пи-мезонов идет в два этапа: сначала рождается некая частица с массой 773 миллиона электрон-вольт, а потом она распадается на два пиона. Время жизни промежуточной частицы вычисляется простым делением постоянной Планка на ширину наблюдаемого «горба». Эта промежуточная частица и есть ро-резонанс, или ро-мезон.

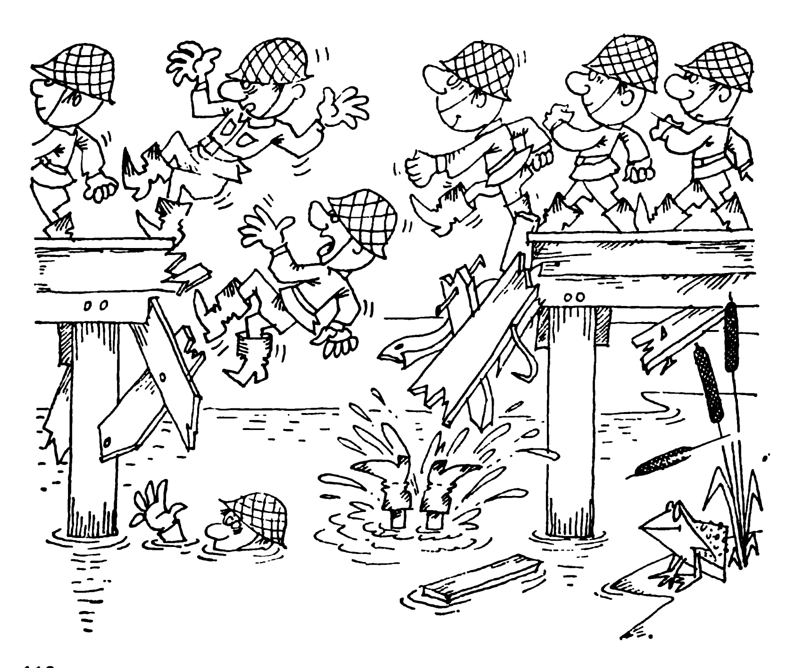
В остальном «ро» ничем не отличается от обычных частиц-долгожителей и обладает всеми нормальными свойствами мезонов. Например, резонанс ро-мезон может быть заряжен положительно, или отрицательно, или быть нейтральным.

Резонанс омега-мезон имеет немного большую массу, но ширина соответствующего ему «горба» примерно в 15 раз меньше, то есть он живет в 15 раз дольше. Известны и более «узкие» резонансы, но все равно их времени жизни не хватает для непосредственной регистрации.

В сущности, физики столкнулись с самым настоящим резонансным явлением, известным и во многих других

разделах науки. В воинской практике издавна существует железное правило: если колонна солдат вступает на мост, немедленно прекращается маршировка «в ногу», ибо парадное шествие может обойтись (и много раз обходилось!) очень дорого — всякий мост имеет привычку немного раскачиваться в такт движению, но, пока толчки ног случайны, размах колебаний невелик, а стоит общим усилием попасть на «любимую частоту» моста, и он не выдержит — рухнет. Если изобразить размах колебаний (амплитуду, говоря научным слогом) как функцию частоты, то в графике вблизи «любимой частоты» моста возникает резкий максимум. Здесь колебания могут стать столь сильными, что вся конструкция не выдержит и развалится. Таково типично механическое проявление резонанса.

С подобным явлением постоянно встречаются и при изучении электрических цепей. Каждый день, настраивая приемник на любимую станцию, вы регулируете специальный контур до тех пор, пока он не «попадает в резонанс» — начинает пропускать радиоволны определенной частоты, на которой и ведется передача со станции.



Ясно, что, меняя размеры моста и материалы, из которых он сделан, или применяя несколько иные радиодетали, мы можем в обоих случаях создать резонансные эффекты при совсем иных частотах. В случае адронных резонансов мы не вольны в своих возможностях — резонансный эффект наступает при определенных энергиях, и обнаруженные значения масс и времен жизни являются характерными и устойчивыми параметрами микромира. В этом смысле резонансы можно рассматривать как полноценные частицы наравне с долгоживущими.

Что же касается позиции экспериментатора, то тут, очевидно, все дело в определенной договоренности. В древние времена частицей могли считать объект, который можно видеть или осязать. Но видеть невооруженным глазом — одно, разглядеть с помощью специального прибора — несколько другое. Применение телескопа и микроскопа Г Галилеем привело к огромному сдвигу в научном постижении мира; но потребовалось немало времени, прежде чем люди осознали объективную реальность наблюдаемых таким образом несовершенств лунной поверхности или беспорядочных метаний мельчайших частичек вещества. В этом отношении ученые всегда пользовались известным преимуществом в понимании новых элементов реальности — они непосредственно ощущали пользу от своих «хитрых» приборов и гораздо быстрее привыкали к представлениям о тех или иных невидимках. Для людей, стоящих в стороне от конкретных естественнонаучных исследований, восприятие несколько затруднялось. Помните великолепные строчки из чеховского «Письма к ученому соседу»: «Как Вы могли видеть на Солнце пятна, если на Солнце нельзя глядеть простыми человеческими глазами...»?

По поводу элементарных частиц также приходится заключать определенный договор. До поры до времени для регистрации новой частицы было необходимо предъявить ее портрет (еще лучше целый альбом!) — фотографию следа в камере Вильсона или ином приборе — переводчике с «микро» на «макро».

Регистрация каждого резонанса требует огромного числа специально обработанных данных, получаемых с сотен фотографий, причем ни на одной из них сам резонанс не оставляет собственного заметного следа — он лишь определенным образом перераспределяет размеры и на-

КРАТКАЯ ТАБЛИЦА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

классы \ частицы			символ	название
фотон			γ	фотон
лептоны			ν_e	нейтрино электронное
лептоны			ν_μ	нейтрино мюонное
лептоны			e	электрон
лептоны			μ	мюон
адроны	мезоны	стабильные	π	пи-мезоны
адроны	мезоны	стабильные	K	ка-мезоны
адроны	мезоны	стабильные	η	эта-мезон
адроны	мезоны	резонансы	ρ	ро-мезоны
адроны	мезоны	резонансы	ω	омега-мезон
адроны	мезоны	резонансы	ψ	пси-мезоны
адроны	барионы	стабильные	p	протон
адроны	барионы	стабильные	n	нейтрон
адроны	барионы	стабильные	Λ	лямбда-гиперон
адроны	барионы	стабильные	Σ	сигма-гипероны
адроны	барионы	стабильные	Ξ	кси-гипероны
адроны	барионы	стабильные	Ω	омега-гиперон
адроны	барионы	резонансы	N_{1470}	N—1470
адроны	барионы	резонансы	⋮	⋮
адроны	барионы	резонансы	N_{3030}	N—3030
адроны	барионы	резонансы	Δ_{1232}	дельта-три-три
адроны	барионы	резонансы	⋮	⋮
адроны	барионы	резонансы	Δ_{3230}	дельта—3230
адроны	барионы	резонансы		⋮

правления заметных следов других частиц. Поэтому наблюдение резонанса предполагает дополнительную процедуру измерения по сравнению с ситуацией, где в игре участвуют только стабильные или долгоживущие частицы. Но если считать реставрацию резонанса по виду распределения видимых следов вполне допустимой операцией, то он становится полноправным членом семейства элементарных частиц.

За последние 15 лет таблица частиц разрослась чуть ли не в 10 раз! Но, как ни странно, поток адронных резонансов не привел к хаосу в наших представлениях о микромире. Сквозь необъятные строки и столбцы таблицы частиц стали просматриваться удивительно четкие закономерности...

СПАСИТЕЛЬНЫЕ СИММЕТРИИ

Согласно библейской легенде Ной начал строить ковчег заранее и именно поэтому вполне благополучно пережил потоп. Нечто подобное произошло и в физике элементарных частиц. К моменту, когда на страницы научных журналов хлынул поток сообщений об открытии адронных резонансов, у теоретиков были подготовлены неплохие спасательные средства с красивым названием Высшие Симметрии. Оказалось, что огромная таблица сильновзаимодействующих частиц-адронов выстроена как бы не из отдельных «кирпичиков», а из целых «крупноблочных конструкций». Иными словами, адроны можно разделять на группы частиц с близкими свойствами, и таким образом наводить среди них весьма четкий порядок.

Что же такое симметрия и о каких свойствах частиц идет речь?

Симметрия буквально означает соизмеримость. Это понятие играет важную роль в физике, как, впрочем, и во многих других областях научной и практической деятельности. Например, архитектор стремится, как правило, создавать симметричные здания со строгим равенством всех деталей относительно центра фасада — справа и слева должно располагаться одинаковое количество колонн, ступеней, окон, дверей...

Такое полностью симметричное здание обладает одним интересным свойством. Предположим, перед вами

лежат два его фотоизображения, причем одно из них получено при непосредственном фотографировании изображения этого же здания в обыкновенном зеркале. Нетрудно догадаться, что при тщательном изготовлении обоих снимков никто не сумеет определить, где же изображено само здание, а где его зеркальный двойник. Мы сталкиваемся здесь с важным свойством симметричного объекта — его вид сохраняется при зеркальном отражении.

На самом деле любые формы симметрии тел или процессов связаны со свойством сохранения какой-либо величины. Верно и обратное утверждение: если есть закон сохранения, то за ним непременно скрывается определенная симметрия. Именно исследование законов сохранения и привело физиков к идеям группировки элементарных частиц.

Прежде всего остановимся на двух так называемых абсолютных законах сохранения: электрического и барионного зарядов (или квантовых чисел). К тому, что электрический заряд в некотором замкнутом объеме не исчезает бесследно и не появляется из ничего, мы привыкли с довольно давних времен. Когда речь идет об элементарных частицах, то закон сохранения электрического заряда означает, что алгебраическая сумма числа положительных и отрицательных зарядов до начала реакции и после нее не изменяется. Этот закон проверен в таком количестве опытов и со столь высокой степенью точности, что его относят к числу абсолютных законов сохранения. Важно то, что он выполняется в любых реакциях и ни одно из известных взаимодействий не способно его нарушить.

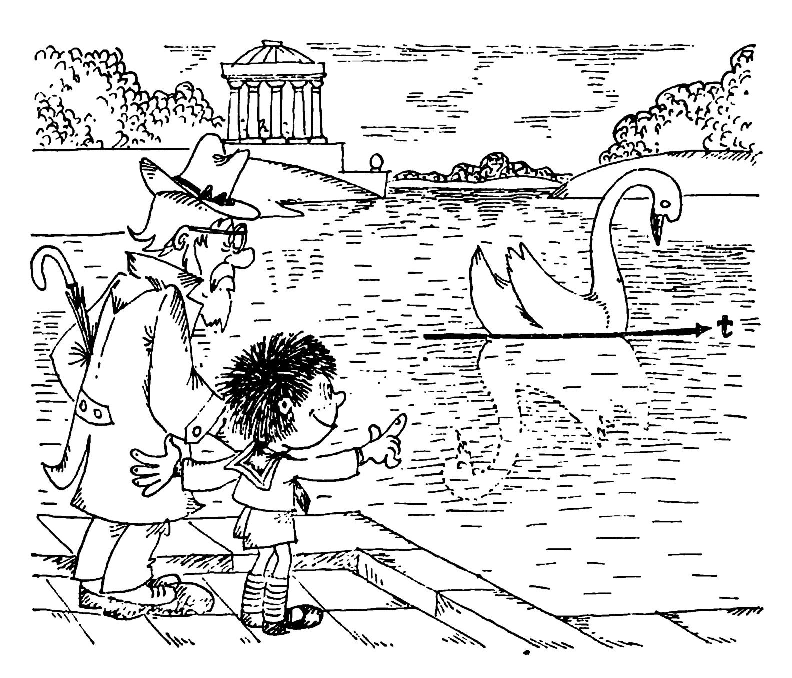
Одно из важнейших проявлений этого закона состоит в том, что электрон — легчайшая из электрически заряженных элементарных частиц — абсолютно стабилен, то есть не способен к самопроизвольному распаду на какие-нибудь более легкие незаряженные частицы, например, на нейтрино.

Другой абсолютный закон сохранения связан со своеобразной закономерностью в поведении барионов, к которым, как вы помните, относятся протон, нейтрон, гипероны и значительная часть известных адронных резонансов. Барионы не могут бесследно исчезнуть или появиться из ничего. Иными словами, сумма числа барионов и антибарионов до какой-либо реакции и после

нее остается постоянной. Формально этот закон можно представлять себе так, что как бы каждому бариону приписывается барионный заряд плюс единица, а каждому антибариону — минус единица, и в любой реакции алгебраическая сумма зарядов будет сохраняться.

Закон сохранения барионного заряда также проверен в огромном количестве опытов и в некотором смысле даже с большей точностью, чем в случае сохранения электрического заряда. Дело в том, что легчайший из барионов — протон — не должен распадаться на какие-то более легкие частицы, например, на мезоны или лептоны, не несущие барионного заряда. Поэтому о протоне говорят: он абсолютно стабилен.

Но, используя определения типа «абсолютно», физики имеют в виду лишь то, что точность, с которой проводятся опыты на сегодняшний день, не позволяет уловить акты распада того же протона. Эта точность имеет вполне конкретную оценку, на основе которой обычно и делается вывод, что протон имеет время жизни больше, чем $2 \cdot 10^{30}$ лет. Аналогичная оценка существует и для



электрона — его время жизни должно превышать $3 \cdot 10^{21}$ лет.

Теперь нам ясно, в каком смысле закон сохранения барионного заряда «сильней» закона сохранения электрического заряда. Практически же можно говорить и об абсолютно точном сохранении зарядов, ведь среднее время жизни и протона и электрона превышает время жизни наблюдаемого участка вселенной (порядка $2 \cdot 10^{10}$ лет)!

Однако приведенное уточнение важно для понимания точки зрения физиков на законы сохранения вообще, идет ли речь о зарядах, импульсе, энергии или других важнейших характеристиках частиц. Всякий закон сохранения не есть какая-то абсолютно непреложная истина, а результат осмысления большого количества экспериментальных данных. Если появляются данные, которые никак нельзя согласовать с тем или иным законом, то его приходится считать приближенным. Тем не менее борьба за каждый закон сохранения идет до самого конца, и тщательно рассматриваются любые идеи, способные его спасти. Вспомним хотя бы историю гипотезы о существовании нейтрино, которая была выдвинута во имя спасения закона сохранения энергии.

Наряду с абсолютными законами сохранения электронного и барионного зарядов, которые играют очень важную и общую роль в наших представлениях о микромире, существуют другие приближенные законы сохранения, на долю которых и выпала главная тяжесть по наведению порядка в чрезмерно разросшейся таблице элементарных частиц.

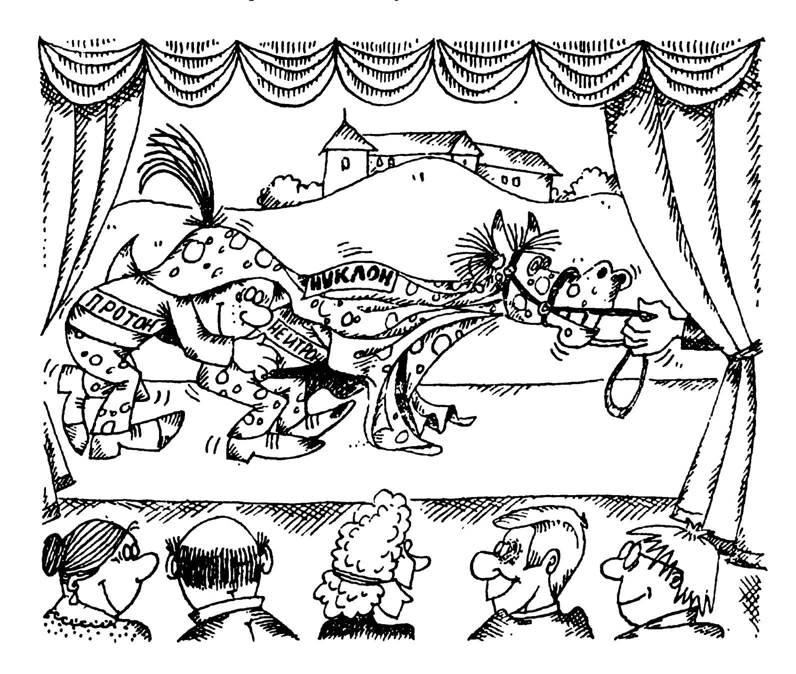
Еще в 1932 году В. Гейзенберг обратил внимание на поразительную схожесть двух фундаментальных составляющих ядерной структуры — протона и нейтрона. Их массы отличались всего на десятую долю процента. И у него возникало, естественно, подозрение: если протон был бы вообще лишен электрического заряда, то не превратился ли бы он в самый настоящий нейтрон?

И тогда В. Гейзенберг выдвинул интересную идею: протон и нейтрон представляют собой просто различные состояния одной частицы — нуклона. Если вообразить мир, в котором «по мановению волшебной палочки» выключились бы электромагнитные взаимодействия, например, все фотоны объявили бы забастовку и не захотели бы вступать в контакт с электрическими заря-

дами, то у физиков не нашлось бы никакого способа узнать, «кто есть кто», — все частицы в ядре выглядели бы на одно лицо. И двуликую природу нуклонов можно установить после этого единственным путем — снова запустить в этот воображаемый мир фотоны и заставить их нести свои важные обязанности по розыску электрических зарядов.

Таким образом, нуклон совмещает в себе представление о двух частицах и как бы расщепляется на протон и нейтрон под действием электромагнитного поля. Аналогичная ситуация имеет место и в случае пи-мезонов. В теории можно рассматривать один пи-мезон, который расщепляется на три наблюдаемых — пи-плюс-, пи-ноль- и пи-минус-мезоны — только при включении электромагнитных взаимодействий. Такое же «сокращение» можно провести и для известных ка-мезонов, гиперонов и резонансов.

Благодаря этому адроны с близкими значениями масс, но различными электрическими зарядами удобно группируются и предстают перед нами в более «крупноблочной» классификации: нуклон, пи-мизон, ка-мезон,



три типа гиперонов (лямбда, сигма, кси) и так далее. То, что на самом деле каждый из них виден в нескольких состояниях, скажем, сигма-гиперон — в трех, является лишь сравнительно малым эффектом. Действительно, разности масс между различными состояниями частиц по сравнению с величинами самих масс этих частиц-адронов ничтожно малы. Можно считать, что разности масс между нейтральными и заряженными адронами, составляющие не более нескольких процентов от этих масс, как раз и обусловлены электромагнитными взаимодействиями.

Такой взгляд на классификацию частиц не покажется столь уж удивительным, если вспомнить, что аналогичным приемом мы часто пользуемся в повседневной жизни. Нам часто приходится иметь дело с объектами, у которых, как говорится, общее преобладает над различиями. Скажем, два жилых дома, построенных по типовому проекту, могут отличаться окраской панелей и отделкой подъездов, наконец, в одном из них может размещаться магазин, а в другом — нет. Эти отличия очень полезны для ориентации, хотя мы прекрасно понимаем, что перед нами дома-близнецы. И особенно просто почувствовать всю второстепенность указанных отличий, оказавшись вблизи домов-близнецов в незнакомом районе и в позднее время, когда мелкие детали как бы растворяются в темноте...

Электромагнитные взаимодействия, нарушающие полную эквивалентность адронов с близкими значениями массы, но различными зарядами, играют в определенном смысле тоже второстепенную роль.

Анализируя близость свойств протона и нейтрона, В. Гейзенберг высказал идею, что эти частицы должны участвовать в сильных взаимодействиях совершенно симметричным образом, как бы забывая о том, что у одной из них есть электрический заряд, а у другой нет. Впоследствии эта идея была распространена и на все другие адроны и получила название изотопической симметрии. Строгой изотопической симметрии соответствует сохранение особой величины, квантового числа, называемого изотопическим спином.

Но, как мы уже успели убедиться, электромагнитные взаимодействия разрушают эквивалентность в поведении заряженных и нейтральных адронов. Поэтому говорят о нарушении изотопической симметрии в

реальном мире и, соответственно, считают, что изотопической спин является лишь приближенно сохраняющимся квантовым числом.

Может возникнуть естественный вопрос: зачем же обсуждать какую-то симметрию законов природы, если она выполняется только в воображаемом мире, а в реальности хоть и сравнительно слабо, но заведомо нарушается?

Этот интересный вопрос затрагивает на самом деле очень глубокие проблемы познания, и он, бесспорно, важен для понимания логики развития физики элементарных частиц, да и любой другой науки.

Физики всегда конструируют воображаемые миры, чтобы глубже постичь закономерности мира реального. Реальность слишком сложна для того, чтобы ее можно было сразу же осознать во всем многообразии. Ученые вынуждены действовать постепенно, шаг за шагом приближаясь к пониманию определенных явлений.

Верно, что в природе нет реального нуклона — это лишь образ, замещающий две частицы (протон и нейтрон), известные нам из эксперимента.

Но ведь в природе нет, скажем, и настоящей окружности в том смысле, как ее понимают геометры. Просто, окружность — это очень полезный и бесконечно привычный образ, с помощью которого мы можем часто с весьма хорошим приближением описывать свойства реальных тел, всегда имеющих хотя бы слабые отклонения от идеальной формы.

В природе нет и «абсолютно твердых тел», которые мы обсуждали в связи со старой моделью электрона-шарика. Однако это весьма полезный образ в механике, который позволяет изучать многие движения с хорошей точностью.

Но вообще-то «вносить в природу» те или иные приближенные образы из конкретных наук надо с осторожностью. Весь многотысячелетний опыт познания говорит о том, что любой самый красивый и, казалось бы, общий научный образ рано или поздно сменяется другим, более красивым и более общим. В свое время активное противодействие представлениям квантовой механики было во многом обязано тому, что в сознании ряда людей, в том числе и физиков, прочно «склеились» образы классической механики и реальный мир. И им трудно было убедить себя в том, что, допустим, траектория

электрона вовсе не необходимая принадлежность реального мира, а полезное приближенное средство для описания движения макроскопических тел.

Все это очень важно иметь в виду, обсуждая дальнейшее развитие принципов классификации в микромире.

Изотопическая симметрия заметно упорядочила наши представления, сгруппировав адроны с очень близкими значениями масс. Но, как вы помните, существовали еще и явления, связанные с рождением необычных, странных частиц в строго определенных комбинациях, скажем, попарно. Например, лямбда-гиперон мог родиться только в паре с положительно заряженным или нейтральным ка-мезоном или, наконец, вместе со своим антиподом — анти-лямбда-гипероном. Такие же закономерности прослеживались и в рождении других гиперонов и ка-мезонов. Когда же наступала пора этим частицам распадаться, такой закономерности уже не наблюдалось — любая из них распадалась на обычные адроны, как бы забывая о правилах своего рождения.

Физики отметили интересное обстоятельство — рождение странных адронов идет со значительно большей интенсивностью, чем их распад. Прямые оценки показали, что в первом случае имеет место сильное взаимодействие, а во втором — слабое. Отсюда был сделан важный вывод: странные адроны несут какой-то своеобразный заряд (квантовое число), который сохраняется в сильных взаимодействиях, но не сохраняется в слабых. Это квантовое число и было названо «странностью». Нуклону и пи-мезону можно было сопоставить нулевую странность — у них не было таких особенностей в поведении, как у странных частиц.

Лямбда- и сигма-гиперонам, независимо от знака электрического заряда, была сопоставлена «странность» минус единица, а кси-гиперону — минус два. Положительно заряженный ка-плюс-мезон и нейтральный ка-ноль-мезон должны были нести «странность» плюс единица, а их античастицы (ка-минус- и анти-ка-ноль) — противоположную. Такая расстановка нового квантового числа полностью объясняла все экспериментально изученные процессы рождения «странных» частиц.

Когда классификация адронов по «странности» была завершена, перед физиками возникла заманчивая аналогия. Раз протон и нейтрон приближенно оказа-

лись разными зарядовыми состояниями одной частицы — нуклона, то не являются ли нуклон и гипероны, в свою очередь, различными по «странности» состояниями одной и той же частицы? Не происходит ли то же самое и с пи- и ка-мезонами?

Для того чтобы поверить в такую возможность, нужно было, конечно, немалое воображение. Ведь симметрия, которая в данном случае могла появиться, была бы нарушена гораздо сильней, чем изотопическая. Это видно хотя бы из того, что разность масс «странных» и «нестранных» адронов не столь уж мала по сравнению с самими величинами масс. Относительная разность может достигать здесь десятков процентов! Теперь уже нарушение новой симметрии нельзя приписать электромагнитным взаимодействиям, а необходимо вводить два типа сильного взаимодействия: предельно сильное и умеренно сильное.

В воображаемом мире, где существует только предельно сильное взаимодействие, все восемь стабильных барионов выглядят как один. Если включить умеренно сильное взаимодействие, то произойдет расщепление на «нестранные» нуклоны и «странные» гипероны — мы как бы увидим 4 типа частиц. И наконец, если включить электромагнитное взаимодействие, то произойдет более полное расщепление, и перед нами предстанут все восемь барионов с различными значениями электрического заряда и «странности».

Нечто подобное произойдет и с восемью стабильными мезонами (тремя пи-, четырьмя ка- и эта-мезонами): в мире предельно сильного взаимодействия они будут на одно лицо, будто это одна частица. По мере включения умеренно сильных и электромагнитных взаимодействий единый мезон будет всё сильней расщепляться, пока не появятся все 8 реальных частиц.

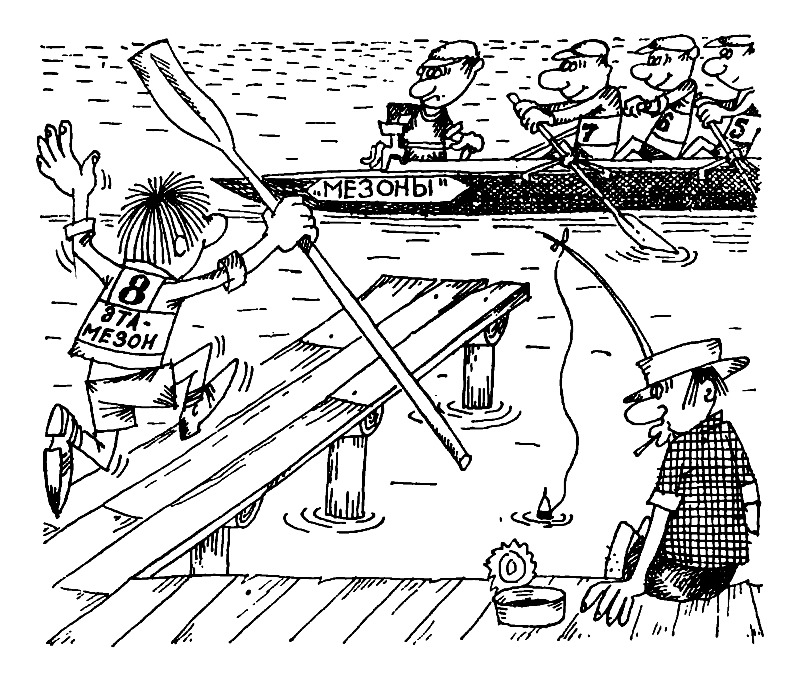
Именно с такой идеей группировки адронов и выступили в 1961 году М. Гелл-Манн и Ю. Нееман. Предельно сильные взаимодействия предположили они, должны обладать особой унитарной симметрией, так чтобы восемь легчайших барионов и восемь легчайших мезонов участвовали в этих взаимодействиях совершенно симметрично независимо от электрических зарядов и «странности».

В новой системе классификации все наблюдаемые адроны относились к определенному набору, который

может включать одну, восемь или десять частиц. Все адроны, в том числе и резонансы, действительно были приписаны к одному из таких наборов. Это привело, конечно, к очень экономичному представлению таблицы элементарных частиц — гораздо более «крупноблочному», чем в случае использования только изотопической симметрии.

Рассматривая каждый набор в воображаемом мире, где учтены только предельно сильные взаимодействия, как единую частицу, можно было затем включить умеренно сильные взаимодействия и оценить возникающее за счет него расщепление масс. Таким способом и были получены соотношения между массами для различных состояний каждого набора. В тех случаях, когда все частицы данного набора были известны, эта операция приводила к удивительно хорошему согласию теории и эксперимента.

Расчет соотношений между массами адронов внутри каждого набора и привел к важному открытию, которое стало основным свидетельством в пользу схемы Гелл-Манна — Неемана.



Дело в том, что, пытаясь укомплектовать набор из 10 барионов, физики столкнулись с небольшой трудностью. Среди известных адронов довольно быстро обнаружились девять хороших кандидатов в эту «десятку». Эти кандидаты представляли собой короткоживущие барионные резонансы: 4 частицы дельта-1232 (это различные зарядовые состояния резонанса, открытого Э. Ферми), 3 сигма-1385 и 2 кси-1530. А вот десятого — «замыкающего» — подыскать не удалось. Его масса была вычислена на бумаге и должна была составлять примерно 1670 МэВ. Были заранее известны и многие другие свойства, например, его «странность» должна была быть равна минус три и электрический заряд — минус единице. Но среди известных адронов такая частица не значилась. И только в самом начале 1964 года из Брукхэвенской национальной лаборатории было получено необходимое известие: на одной из 50 тысяч фотографий зарегистрирован каскад из целых семи частиц, связанный с распадом нового гиперона с массой около 1670 МэВ! Новая частица была названа омега-минус-гипероном.

Открытие омега-минус-гиперона укрепило веру в унитарную классификацию, и в настоящее время она считается общепринятой. Это, конечно, не означает, что физикам стало все ясно в адронном мире. Остаются и возможности обобщения, и непонятные проблемы.

Дело в том, что с математической точки зрения и изотопическая симметрия В. Гейзенберга, и унитарная симметрия, предложенная М. Гелл-Манном и Ю. Нееманом, являются различными формами унитарных симметрий общего типа. Вторая оказывается просто симметрией более высокого типа, чем первая; именно поэтому она и позволяет объединять частицы в более крупные наборы, «блоки», и часто называется Высшей Симметрией.

А не могут ли проявиться еще более высокие унитарные симметрии адронов? Такую возможность никак нельзя исключить. Ведь схема Гелл-Манна — Неемана основана на сохранении только двух квантовых чисел — электрического заряда и «странности».

В 1964 году американские теоретики Дж. Бьеркен и С. Глешоу ввели в рассмотрение новый точный или приближенный закон сохранения, соответствующий особому квантовому числу — «очарованности». Та-

кая возможность открывала путь к более высокой симметрии сильных взаимодействий и позволяла преодолеть некоторые проблемы предшествующих моделей.

Едва ли не главная из этих проблем состояла в том, что схема классификации Гелл-Манна — Неемана допускала существование удивительных наборов из 3 частиц. Просто не обращать внимания на эти наборы было нельзя, так как они играли фундаментальную роль для указанной схемы. Но частицы в этих наборах должны были иметь столь необычные свойства — в частности, дробные электрические и барионные заряды, —что включить их в рассмотрение было не так уж просто. Итак, либо новый закон сохранения, либо совершенно необычные частицы...

Впрочем, проблема этих удивительных частиц оказалась глубже, чем можно представить себе, рассуждая о том или ином варианте унитарной классификации.

Высшие симметрии микромира часто сравнивают с красивым замком. Действительно, группировка огромного количества адронов по определенным свойствам напоминает своеобразную архитектурную работу — все элементы выстраиваются в какую-то четкую взаимосвязанную конструкцию, которая воспринимается гораздо легче, чем отдельные разбросанные элементы. Такое упорядочивание, по сути дела, означало создание спасительного ковчега, позволившего пережить трудные времена резонансного потопа, но его вполне разумно сравнивать и с возведением замка.

Но тут-то в ответ на необычайную щедрость природы, которая ввела в микромир свыше 200 адронов, физики решили проявить предельную экономичность, граничащую со скупостью. Этот шаг, к обсуждению которого мы сейчас переходим, привел к тому, что в замке высших симметрий замаячили настоящие призраки...

НАШЕСТВИЕ ПРИЗРАКОВ

Как и герои древних преданий, призраки микромира имели реальных предков и довольно любопытную родословную. История появления этих призраков как раз и связана с удивительным сочетанием щедрости природы и скупости физиков.

Скупость эта проявилась довольно рано — еще то-

гда, когда адронный мир, казалось бы, строился всего из двух типов частиц — нуклонов и пи-мезонов. О ка-мезонах и гиперонах существовали лишь предварительные данные, а до резонансного потопа было совсем далеко. Но даже два типа адронов показались физикам излишней роскошью для таблицы элементарных частиц. Летом 1949 года Э. Ферми и его девятнадцатилетний аспирант Ч. Янг написали статью, которая прямо так и называлась: «Являются ли мезоны элементарными частицами?»

Авторы начали с естественного предположения о том, что в природе существуют антинуклоны (кстати, антипротон и антинейтрон будут открыты только через несколько лет после появления их статьи). Далее они высказали гипотезу, что пи-мезон представляет собой просто связанное состояние нуклона и антинуклона, а не особую элементарную частицу, как это думал Х. Юкава, и попытались оценить основные свойства этого составного ядерного кванта. Правила составления наблюдаемых пи-мезонов можно проследить, пользуясь простой зарядовой арифметикой: положительно заряженный пи-мезон должен состоять из протона и антинейтрона, отрицательно заряженный — из нейтрона и антипротона, и нейтральный пи-мезон — из смеси пар протон — антипротон и нейтрон — антинейтрон. Во всех случаях у мезонов оказываются правильные значения электрических зарядов, а их барионные заряды равны нулю.

Модель Ферми — Янга была интересна, но в некоторых отношениях непоследовательна. Трудно было, например, объяснить природу сил, склеивающих тяжелые частицы — нуклон и антинуклон — в сравнительно легкую — пи-мезон. Поэтому многие физики сначала отнеслись к этой модели без особого энтузиазма. Однако заложенные в ней идеи — прежде всего стремление обходиться предельно малым числом действительно элементарных частиц — были исключительно полезны, и через несколько лет эти идеи стали интенсивно развиваться.

После того как «странные» частицы — ка-мезоны и гипероны — окончательно утвердились в качестве особого класса адронов, стало ясно, что одним нуклоном при построении составной модели частиц не обойтись. Ведь нуклон представлял собой образ двух барионов, не имеющих «странности» (протона и нейтрона), а из

них никак нельзя было построить, скажем, «странный» ка-мезон. Поэтому физикам пришлось привлекать третью фундаментальную частицу — один из «странных» мезонов или гиперонов. Именно по этому пути и пошли создатели первых универсальных моделей составных адронов советский теоретик академик М. Марков и японский ученый С. Саката.

Несколько более наглядная модель С. Сакаты представляет собой прямое развитие идей Э. Ферми и Ч. Янга. В качестве трех фундаментальных частиц он выбрал протон, нейтрон и лямбда-гиперон и показал, что из них можно в принципе выстроить все остальные частицы адронного семейства. Пи-мезоны строились в этой схеме по тем же правилам, что и в модели Ферми — Янга, а для «странных» мезонов и гиперонов использовались чуть более сложные правила той же зарядовой арифметики (с учетом «странности»). Например, ка-мезон с отрицательным электрическим зарядом и «странностью» минус единица можно построить из лямбда-гиперона (электрический заряд — ноль, «странность» — минус единица) и антипротона (электрический заряд — минус единица, «странность» — ноль), а отрицательно заряженный кси-минус-гиперон со «странностью», равной минус два, — из двух лямбда-гиперонов и одного антипротона.

Подобно тому, как протон и нейтрон представляли собой различные состояния нуклона, 3 частицы: протон, нейтрон и лямбда-гиперон — должны были представлять 3 различных состояния некоторой фундаментальной частицы — с а к а т о н а. В воображаемом мире, где действует только предельно сильное взаимодействие, существовал бы единственный вид фундаментальных адронов — сакатоны. При включении умеренно сильных взаимодействий наблюдалось бы уже два типа частиц — нуклон и лямбда-гиперон, то есть тот же сакатон, как бы расщепленный на два наблюдаемых состояния. И наконец, при включении электромагнитных взаимодействий, когда в микромир допускались фотоны, способные реагировать на электрические заряды, нуклон, в свою очередь, расщеплялся, и появлялись все 3 известных легчайших бариона — протон, нейтрон и лямбда-гиперон.

Гипотеза о фундаментальной роли сакатона оказалась весьма привлекательной и чуть ли не десять лет

владела умами исследователей микромира. Еще бы! Ведь, имея перед собой таблицу элементарных частиц, можно было буквально за несколько минут убедиться, что все адроны соответствуют той или иной комбинации из 3 легчайших барионов.

Следовательно, таблица истинно элементарных частиц становилась значительно короче: наряду с фотоном и лептонами она должна была включать только три адрона — протон, нейтрон и лямбда-гиперон, да и те оказывались на самом деле лишь тремя возможными состояниями одного адрона — сакатона...

Остальные адроны являлись составными частицами — вроде атомных ядер.

Но, конечно, физическое понимание такой составной модели не может быть ограничено формальным подбором правильных зарядовых комбинаций. Несмотря на многие интересные попытки улучшения, модель фундаментального сакатона так и не справилась с теми трудностями, которые она, можно сказать, унаследовала от своей предшественницы — модели Ферми — Янга.

Во-первых, аналогия между составными адронами и атомными ядрами не столь уж проста. Как вы помните, протоны и нейтроны, будучи связаны в атомное ядро, теряют на эту связь лишь малую долю своей массы — менее одного процента. Совсем другая ситуация наблюдается в том случае, когда мы пытаемся описать, скажем, пи-ноль-мезон как связанное состояние протона и антипротона. Ведь величина энергии связи протона с антипротоном в 13 раз превышает массу наблюдаемого связанного состояния: пи-ноль-мезона! Напрашивается вывод, что, во-первых, внутренняя структура составных адронов должна иметь какие-то качественные отличия от тех структур, которые известны нам из физики атомов и атомных ядер.

Во-вторых, по-прежнему нуждалась в объяснении природа сил, склеивающих сакатоны в составные мезоны и барионы.

В-третьих, было неясно, чем же качественно выделены именно протон, нейтрон и лямбда-гиперон среди всех других барионов и мезонов. Почему и в каком смысле именно они должны быть более элементарными, чем другие адроны? Ведь массы протона, нейтрона и лямбда-гиперона очень близки по величине к массам сигма- и кси-гиперонов. Тем более что, как вы помните,

при создании унитарной классификации все эти нуклоны и гипероны очень естественно вписались в одну из «восьмерок», то есть должны были представлять собой просто 8 различных состояний какой-то одной частицы.

И вообще, согласно схеме унитарной классификации ни один из наблюдаемых мезонов или барионов ничем особым не выделен, ни один из них не может претендовать на роль более элементарной частицы, чем остальные адроны.

Вот именно это последнее обстоятельство и оказалось непреодолимой трудностью для модели фундаментального сакатона.

Сакатон вынужден был уйти из мира реальных частиц и поселиться в красивом замке унитарной симметрии на правах призрака, изменив имя и даже некоторые свойства.

В 1964 году М. Гелл-Манн и молодой теоретик из ЦЕРНа Дж. Цвейг обратили внимание на то, что существует отличная возможность описать все наблюдаемые адроны как определенные составные конструкции из некоторых новых частиц, которые тоже укладываются в схему унитарной классификации, но обладают весьма оригинальными свойствами, резко выделяющими их среди собратьев по микромиру. Речь шла как раз о тех объектах, которые должны были входить в унитарные наборы из трех частиц.

С легкой руки М. Гелл-Манна новые гипотетические частицы стали называться кварками. Необычное слово вызвало, конечно, удивление, но прижилось в физике чрезвычайно быстро. М. Гелл-Манн отыскал его в фантастическом романе «Поминки по Финнегану» — последнем произведении крупнейшего ирландского писателя Дж. Джойса. В этом романе некий таинственный голос вещает о «трех кварках», что звучит в контексте непонятно, но угрожающе. С другой стороны, в немецком языке слово «кварк» имеет совершенно безобидный смысл — «творог». Вот и пойми, что предрекается: то ли злые духи, то ли вкусные творожники...

Мне кажется, что кварк завоевал симпатии физиков по довольно простой причине, благодаря явному созвучию с привычным словом квант — чувствуется, что кварк должен быть осколком чего-то, и не просто частью, а чем-то с трудом отщепленным, скорее всего остроугольным...

Кварк вошел в физику полноправным наследником сакатона. В отличие от последнего он не должен был соответствовать каким-либо уже известным адронам. Однако подобно тому, как сакатон был единым представлением трех частиц — протона, нейтрона и лямбда-гиперона, кварк по праву наследования стал представлять три частицы, которые так и были названы по аналогии — пэ-кварк (p), эн-кварк, (n) и лямбда-кварк (λ).

Необычные свойства кварков выражались прежде всего в том, что их барионные и электрические заряды имели дробные значения в единицах зарядов протона или любой другой известной элементарной частицы. В частности, все барионные заряды кварков должны были составлять $^1/_3$ заряда известных барионов. Пэ-кварк должен был, кроме того, иметь положительный электрический заряд, равный $^2/_3$ заряда протона, а остальные два — эн- и лямбда-кварки — должны были иметь отрицательные заряды по ($^1/_3$). И наконец, лямбда-кварк еще обладал «странностью», равной минус единице (—1). При внимательном взгляде на кварки нетрудно заметить, что они действительно напоминают компоненты сакатона — протон, нейтрон и лямбда-гиперон — с той разницей, что барионные заряды кварков меньше на $^2/_3$, а электрические на $^1/_3$, чем у этих барионов.

Предсказание дробных зарядов у кварков показалось физикам весьма необычным, но оно, в сущности, не нарушало никаких фундаментальных законов природы. То, что, например, электрические заряды всех наблюдаемых частиц либо равны по абсолютной величине заряду электрона, либо больше его в целое число раз, — просто экспериментальный факт, смысл которого пока непонятен. И если обнаружились бы более мелкие порции электричества, то это стало бы просто нарушением традиции, а не каких-то определенных законов.

Гораздо более удивительным оказалось другое обстоятельство. Кварковая модель стала превосходным средством для наведения порядка в микромире и испытала большой успех в самых различных приложениях, но вот сами кварки, несмотря на чрезвычайно активные поиски, так и не удалось обнаружить.

Посудите сами. Любой известный барион без труда строится в виде комбинации из трех кварков. Скажем, протон должен состоять из двух пэ-кварков и одного эн-

кварка, а отрицательно заряженный кси-минус-гиперон из эн-кварка и двух лямбда-кварков. Пользуясь все той же простой зарядовой арифметикой, можно составить и любой мезон — он непременно должен содержать какой-либо кварк и антикварк, чтобы суммарный барионный заряд этой комбинации был равен нулю. Например, положительно заряженный пи-мезон состоит из пэ-кварка и эн-антикварка, а отрицательно заряженный ка-мезон — из лямбда-кварка и пэ-антикварка. В общем, положив перед собой таблицу известных адронов и вспомнив заряды различных кварков, вы могли бы очень быстро установить кварковый состав всех частиц и античастиц.

Но успехи кварковой модели не ограничивались такой удачной классификацией адронов. Модель давала и вполне определенные предсказания о закономерностях, которые должны наблюдаться в процессах сильных, электромагнитных и слабых взаимодействий при рассеянии и распадах адронов. Большинство таких предсказаний удивительно хорошо подтверждается экспериментальными данными.

Не менее важно и другое — именно кварки позволяли верить в глубокий смысл обнаруженных законов симметрии микромира. Можно сказать, что гипотетические частицы наполнили жизнью красивый замок унитарных симметрий; без кварков он казался бы пустынной, наскоро сколоченной времянкой. Но кварки до сих пор так и остались призраками! Они приносят большую пользу, о них много сказано и написано, наконец, большинство физиков верят в их существование. Но их никто и никогда так и не наблюдал. Между тем история ловли кварков ничуть не уступает, даже, пожалуй, превосходит по драматизму охоту за космическими лучами.

Кварки искали не только на земле, под землей или под водой. Чтобы обнаружить какой-нибудь «зазевавшийся» призрак, перетирались в порошок целые метеориты. Их пытались зарегистрировать в самых первых образцах лунного грунта, с великими трудами и затратами доставленных на нашу планету.

Дело в том, что по крайней мере один из кварков должен был оказаться стабильным, и в силу закона сохранения электрического заряда его дробный заряд можно было бы обнаружить даже после всевозможных взаимодействий этого кварка с обычными частицами ве-

щества. Именно поэтому физики уделяли большое внимание поиску кварков с дробными зарядами и в макроскопических кусках вещества.

Более того, физики обратились к анализу истории наблюдаемой вселенной и к исследованию строения звезд. Уже в 1965 году — всего через год после появления гипотезы кварков — советские теоретики Я. Зельдович, Л. Окунь и С. Пикельнер опубликовали большую статью под названием «Кварки: астрофизический и физико-химический аспекты». В этой работе были даны оценки допустимой плотности реальных кварков в связи с самыми различными возможностями их существования. Вывод был не слишком утешителен; кварков должно быть в 10^9—10^{18} раз меньше, чем нуклонов. Последующие теоретические и экспериментальные работы в основном подтвердили это заключение. Кварки, даже если они и существуют в виде отдельных частиц, — редчайшие «звери». Число нуклонов должно, по крайней мере, в тысячи миллиардов раз превышать число кварков...

И уж конечно, трудно перечислить все эксперимен



ты по поиску кварков в потоках космических лучей и среди миллионов событий, полученных на крупнейших ускорителях мира. В программах «Серпухова» и «Батавии» кварковый эксперимент стоял на первом месте — еще только «прогревая» синхротроны для долгосрочной работы, физики пытались отыскать в регистрирующих устройствах следы дробно-заряженных частиц. Упорное нежелание кварков предстать пред нетерпеливыми взорами экспериментаторов стало вызывать тревожные размышления.

Как бы то ни было, а гипотетические частицы оказались предельно экономичным средством для «сборки» любого известного адрона. Поэтому сначала даже некоторые существенные неясности в отношении природы сил, связывающих кварки, не могли поколебать безграничной веры большинства физиков в их реальность. В пользу сторонников реальных кварков свидетельствовали и известные вам исторические аналогии.

Вспомните, заявляли они, сколько добрых дел успел совершить протон задолго до своего настоящего открытия. А за 15 лет до экспериментальной регистрации пи-мезона была правильно описана структура атомных ядер, причем ядерный квант до сих пор не раскрывает многих своих тайн. А сколько лет отделяст тюбингенское послание В. Паули от занесения в таблицу элементарных частиц «короля конспирации» нейтрино? А разве не пытались некоторые физики всего за три-четыре года до открытия антипротона придумать уродливую антивселенную с одними позитронами? Да что уж там маленькие сроки, каких-то 15—20 лет, продолжали они, атомистическая гипотеза дожидалась доказательств два с половиной тысячелетия! А ведь все успехи молекулярно-кинетической теории теплоты в прошлом веке связаны именно с атомистическими представлениями. Теперь же, изучив атомно-молекулярный, ядерный и «элементарно-частичный» уровни строения вещества, мы стоим на пороге нового, еще более глубокого уровня, и стоит ли предаваться сомнениям относительно реальности кварков, которые вот-вот окажутся превосходным примером предоткрытия?

Но тут-то и стали выясняться любопытные обстоятельства, показавшие, что простые исторические параллели проводить пока еще рано.

Во-первых, оказалось, что кварковую модель можно,

а в некоторых случаях и необходимо, расширять и дополнять.

Как вы помните, в процессе развития теории симметрий физики столкнулись с возможностью введения нового, почти сохраняющегося квантового числа — «очарования». С точки зрения кварковой модели это связано с существованием четвертого «очарованного» кварка (или цэ-кварка (с), как его часто называют). Цэ-кварк может иметь тот же электрический заряд, что и пэ-кварк, но, кроме того, ему приписывается значение «очарованности», равное единице. Интересно, что в модели с четырьмя кварками можно вообще избежать введения дробных зарядов — все кварки смогут соблюсти традицию микромира.

Реальные «очарованные» частицы — так называемые дэ-мезоны — были обнаружены совсем недавно, в мае 1976 года, группой Дж. Гольдхабера. Эти новые мезоны должны содержать наряду с обычным кварком и «очарованный» цэ-кварк. Интересно, что четвертый кварк еще до открытия дэ-мезонов выполнял в теории важные обязанности. Дело в том, что в теории слабых взаимодействий адронов, ограниченной представлением о трех фундаментальных кварках, предсказывалась сравнительно большая вероятность распада нейтрального ка-мезона на положительный и отрицательный мюоны. Между тем этот распад вообще не был обнаружен экспериментально. Это оказалось очень неприятным сюрпризом для современной теории, и длительное время было неясно, откуда возникает запрет на такой распад. Высказывались даже гипотезы о нарушении тех или иных фундаментальных принципов физики. Однако выход нашелся на довольно простом пути — как раз учет четвертого «очарованного» кварка в структуре адронов позволит теоретикам объяснить отсутствие ненаблюдавшегося распада.

В этом плане физики часто говорят, что четвертый кварк проник в число фундаментальных составляющих адрона «по запросу» теории слабых взаимодействий. Зато другое, более крупное расширение таблицы кварков произошло из-за одной неприятной особенности в объяснении структуры адронов, которая возникла буквально вместе с трехкварковой моделью.

Некоторые адроны должны были составляться из набора одинаковых кварков, и хотя бы два из них вынуж-

дены были находиться вдвоем или втроем в одинаковом состоянии.

Попытки найти выход из столь трудного положения начались сразу же после появления гипотезы кварков и привели к модели с утроенным кварковым миром, сформулированной в 1965 году академиком Н. Боголюбовым и его учениками и независимо от них американскими теоретиками М. Ханом и И. Намбу. Предполагалось, что существует три типа кварков, различающихся по какому-то признаку. Впоследствии этот признак назвали «цветом» и условились «раскрашивать» кварки одной из трех красок — желтой, синей или красной. Обычные адроны считались «белыми» частицами, что, естественно, имеет место при равномерном смешении трех указанных цветов (проверьте сами, если увлекатесь рисованием). Теперь, например, тот же омега-гиперон включает уже три разноцветных лямбда-кварка, и никаких неприятностей с применением принципа Паули не возникает — ведь речь идет о трех различных частицах. В общем, как вы видите, кварковая модель находится в процессе развития и существуют различные интересные варианты оригинальной реализации призраков в будущих экспериментах.

Но еще любопытней оказалась другая точка зрения. Многие физики, подавленные неудачами в поиске кварков с дробными или целыми зарядами, стали утверждать, что призраки никогда и не объявятся. Во всяком случае, их нельзя будет зарегистрировать как обычные частицы по следам и даже косвенными методами, как в случае резонансов. Они могут существовать только внутри адрона, навеки запертые в своей темнице гигантскими силами, которые не убывают, а возрастают с увеличением расстояния. Так что никакими могучими воздействиями кварк из адрона добыть невозможно, и тогда уж действительно стоит говорить о «бедненьких привидениях».

Последующее развитие эксперимента и теории превратили эти первоначальные подозрения в весьма правдоподобную гипотезу. Судя по всему, следующий уровень строения вещества не желал повторять пройденное...

Итак, настал момент, когда необходимо подвести некоторые итоги. Мы с вами стали свидетелями различных периодов в развитии физики элементарных частиц.

Казалось бы, не так уж далеки те времена, когда было открыто очень мало частиц, скажем, только три — электрон, фотон и протон, — и естественно, что современники рассматривали их как истинно элементарные «кирпичики мироздания». Когда количество известных частиц увеличилось едва ли не в 100 раз, физикам стало ясно, что «кирпичиков» слишком много, чтобы каждый из них мог претендовать на такую почетную роль. Прежде всего свое сложное устройство продемонстрировали адроны — именно они стали первыми кандидатами на роль составных «элементарных» частиц и, по сути дела, утратили право называться элементарными.

Кварковая модель подытожила в определенном смысле наши представления о возможной составной природе адронов. Их классификация выглядит на сегодняшний день столь убедительно, что большинство физиков уверены в правильности гипотезы о кварковом строении. Все сильней становится подозрение — скорее уже уверенность! — что кварки должны сыграть примерно такую же роль в понимании таблицы элементарных частиц, как атомы в понимании периодической системы элементов Д. Менделеева.

Потому многие физики склонны считать, что уже существует принципиальная схема для построения таблицы истинно элементарных частиц, где не найдется места ни для одного из экспериментально открытых на сегодняшний день адронов! Что же должно включаться в эту гипотетическую таблицу?

В ней по-прежнему будут обитать фотон и четыре типа лептонов. Впрочем, эксперимент указывает и на возможное образование нового типа лептонов — тяжелого эл-лептона, масса которого значительно больше массы мюона. К ним присоединятся своеобразные субадроны: 12 кварков, а для обеспечения связи между кварками могут вводиться особые частицы г л ю о н ы (от английского glue — клей).

Стоит еще раз напомнить, что кварки, о которых здесь сказано, являются лишь различными состояниями одной частицы, которые существуют в нашем реальном мире, где включены все типы взаимодействий. То же самое относится и к глюонам — на самом деле можно говорить об одном глюоне, имея в виду его расщепление на 8 различных состояний в нашем реальном мире.

К этим частицам впоследствии может присоединить-

ся еще один гипотетический тип частиц — так называемые дубль-вэ-мезоны и зэт-ноль-мезоны — особая разновидность квантов, обеспечивающих слабые взаимодействия элементарных частиц подобно тому, как фотоны обеспечивают электромагнитные взаимодействия.

К обсуждению гипотетических переносчиков взаимодействия глюонов, дубль-вэ- и зэт-мезонов мы еще возвратимся в следующей главе. Здесь же для нас важно почувствовать общую современную тенденцию к сокращению числа истинно элементарных частиц.

В таком проекте адронам отводится роль сложных составных объектов, все свойства которых можно выводить из их кварковой структуры, подобно тому, как все свойства атомов можно вывести, зная законы их строения, из ядер и электронов. Казалось бы, все выглядит просто и пригоже — стоит только отыскать кварки и другие, пока гипотетические, частицы, и мы сможем получить экспериментально обоснованную новую картину микромира.

Но не будем забывать, что перед нами только проект, причем проект, основанный на довольно прямой аналогии с устройством уже известного атомного уровня строения вещества. А ведь история не очень любит «возвращаться на круги своя». Не все так уж просто с применением аналогий при движении в глубь вещества. Далеко не все так просто...

Нет, например, никакой уверенности, что мы действительно сумеем извлечь кварки из адронов в виде каких-то отдельно существующих частиц. Не исключено и такое на первый взгляд парадоксальное положение дел, что вопрос о кварках вне адронов вообще лишен смысла. Что же касается поведения кварков и их свойств, когда они находятся внутри адрона, то отнюдь не ясно, можно ли говорить вообще о движении каких-то объектов типа обычных элементарных частиц в столь плотном веществе. Ведь средняя плотность адрона примерно в 10^{14} раз превышает плотность обычной воды, и ни одно из известных науке веществ не обладает даже близкой плотностью...

Как должны вести себя силы, действующие между кварками? Пока на этот вопрос мы можем отвечать, пользуясь лишь косвенными данными, то есть непосредственно изучая только силы взаимодействия между ад-

ТАК МОЖЕТ ВЫГЛЯДЕТЬ В НЕДАЛЕКОМ БУДУЩЕМ ТАБЛИЦА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

классы \ частицы		символ	название
фотон		γ	фотон
лептоны		ν_e ν_μ e μ	нейтрино электронное нейтрино мюонное электрон мюон
мезоны		W Z^0 ⋮	дубль-вэ-мезон зэт-мезон ⋮ ?
субадроны	кварки	p n Λ c	пэ-кварк эн-кварк лямбда-кварк цэ-кварк ⋮ ? — ×3 «цвета» (желтый, синий, красный)
	глюоны	g_1 g_2 g_3 ⋮ g_8 ⋮ ?	глюоны — ×3 «цвета» (желтый, синий, красный)

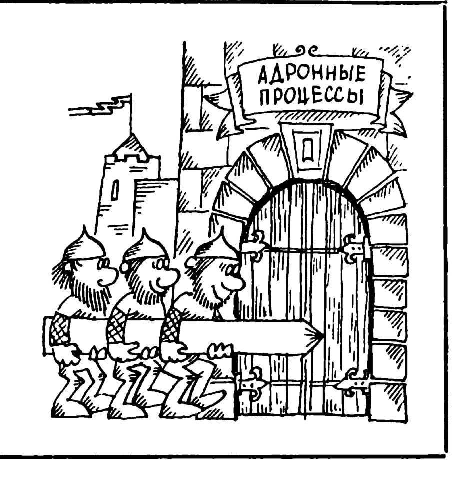
ронами или между адронами и лептонами или адронами и фотоном. Если реальные кварки не будут обнаружены, то у нас так никогда и не появится иного способа исследования межкварковых сил.

Что же может получиться? Не сведется ли все к тому, что кварки так и нельзя будет отделить от наблюдаемых адронов и изучить независимым образом? Но в таком случае адроны должны будут по-прежнему фигурировать в таблице элементарных частиц...

Видимо, реальная ситуация в физике элементарных частиц несколько сложней, чем мы до сих пор ее себе представляли. И необходимо подробней разобраться в свойствах тех взаимодействий, которые обусловили наблюдаемое многообразие микромира...

ГЛАВА ПЯТАЯ,

ГДЕ РАССКАЗАНО ОБ ОЧЕНЬ СЛОЖНЫХ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦАХ — АДРОНАХ



Проект — это черновик будущего. Иной раз будущее требует сотни черновиков.

Ж. Ренар

КАК ВЫГЛЯДИТ АДРОН?

Исследуя любую структуру, человек должен прежде всего найти способы воздействия на нее. Только это позволит ему понять роль отдельных элементов структуры и их взаимосвязи. Так поступает едва ли не каждый ребенок, получивший в подарок красивую и сложно устроенную игрушку. Малыш со всей доступной ему скоростью стремится проникнуть в секреты механизма, чаще всего безнадежно портит всю хитроумную внутреннюю механику, но и это полезные шаги к постижению мира. Пожалуй, любому из нас знакома хотя бы раз в жизни нападающая страсть — разобрать часы до последнего винтика.

Конечно, проникновение в каждую структуру требует особого инструмента. Игрушку можно разломать, пользуясь обычным молотком или другой «железкой». Чтобы аккуратно разобрать часы, необходимы гораздо более тонкие приспособления — специальные отвертки и пинцеты. При этом, как правило, мастер вынужден применять увеличительное стекло, с помощью которого четко различает мелкие детали.

Чтобы рассмотреть, скажем, кристаллическую струк-

туру обычного вещества, исследователи применяют рентгеновские лучи, имеющие столь малую длину волны, что они чувствуют уже микроскопические детали строения. Еще сложнее увидеть отдельные молекулы и атомы — теперь уже необходимо применять особо короткие дебройлевские волны, связанные с потоками быстрых электронов или ионов.

А как быть в случае элементарных частиц, которые представляют собой вроде бы простейшие структурные составляющие вещества? Интуитивно ясно, что при изучении структуры каких-либо объектов хорошо бы использовать наиболее простые из них. Например, по отношению к атомам такими более простыми объектами могут служить атомные ядра или отдельные элементарные частицы. Для самих же частиц остается единственный способ выяснения их структуры — бомбардировка такими же частицами.

Не существует какого-либо инструмента с заранее известными свойствами, которым можно было бы почувствовать детали строения отдельного представителя микромира. Ведь каждый инструмент должен, в свою очередь, состоять из элементарных частиц. Это и определяет специфику исследования мельчайших составляющих вещества. Все опыты в данной области должны быть устроены по образцу тех мысленных экспериментов по рассеянию электронов, которые мы рассматривали во второй главе, в связи с вероятностной трактовкой квантовой механики.

В начальный момент времени имеются только свободные частицы, скажем, в пучке ускорителя и в веществе мишени. Когда частицы ускоряются до нужной энергии, пучок сбрасывается на мишень и за очень малое время происходит взаимодействие между частицами пучка и мишени. После взаимодействия исходные частицы, которые присутствовали вначале, и вновь родившиеся разлетаются и регистрируются специальной аппаратурой в некоторый конечный момент времени, когда их снова можно считать свободными.

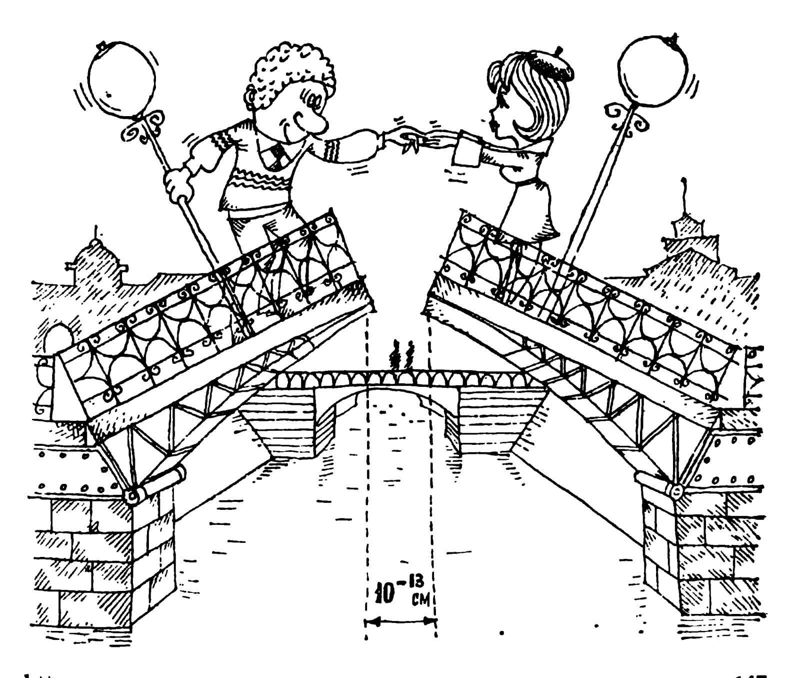
Время движения частиц в свободном состоянии должно намного превышать тот промежуток времени, в течение которого они взаимодействуют. Действительно, длительность взаимодействия, как правило, очень мала — это микроскопическая величина; тогда как за время свободного движения частица должна успеть оставить мак-

роскопический след. Поэтому физики часто говорят так: частицы приходят из минус бесконечности ($-\infty$), взаимодействуют в момент времени, который условно соответствует центру временной оси — нулю, и после взаимодействия уходят на плюс бесконечность ($+\infty$).

Особенно серьезные проблемы возникают в тех случаях, когда мы имеем дело с очень малыми размерами области взаимодействия, то есть того объема, в котором сталкивающиеся частицы вступают в определенный контакт друг с другом.

Например, сильные взаимодействия играют роль только в том случае, когда частицы находятся на микроскопически малых расстояниях. Протон и нейтрон могут испытывать сильнейшее взаимное притяжение, но стоит им разойтись на расстояние, заметно превышающее 10^{-13} сантиметра, и они начинают вести себя как свободные частицы.

У физиков нет возможности поместить особую аппаратуру в столь малую область пространства. Как вы помните, всякое устройство для перевода информации с «микро» на «макро» должно состоять из огромного



числа атомов. Поэтому, изучая сильные взаимодействия, приходится измерять непосредственно лишь характеристики (импульсы, массы, заряды) свободных частиц, находящихся на больших расстояниях друг от друга задолго до взаимодействия и через большой промежуток времени после того, как само взаимодействие прекращается. И только по закономерностям изменения этих характеристик мы можем судить о том, как устроены взаимодействия и как выглядят участвующие в них частицы.

Такое положение дел приводит к несколько непривычной картине, когда о строении объектов вообще ничего нельзя сказать вне исследования взаимодействия между ними. В свою очередь, силы, действующие между частицами, приходится довольно сложным образом реконструировать по тем закономерностям поведения частиц, которые наблюдаются в различных реакциях.

Но это может показаться удивительным лишь на первый взгляд. Ведь и в своем повседневном опыте мы, строго говоря, не можем изучать структуру какого-либо объекта, не оказывая на этот объект определенного воздействия.

Скажем, исследуя незнакомую комнату, мы непременно воспользуемся освещением, на худой конец, постараемся осторожно действовать на ощупь. Возможности осветить помещение, видеть или осязать предметы, находящиеся в нем, считаются как бы само собой разумеющимися. Поэтому мы обычно воспринимаем устройство такой комнаты как нечто раз и навсегда данное, не зависящее от способа воздействия. Между тем дело здесь просто в слабости этого воздействия. Разумеется, поток света из окна или от электролампы не способен что-либо разрушить в комнате, изменить расстановку мебели и т. п. Если же действовать в темноте и на ощупь, то нетрудно навести такой беспорядок, что и не догадаешься о первоначальном расположении предметов...

Вообразим теперь такую полуфантастическую ситуацию, когда перед нами находится какое-то сложное устройство внутри большого ящика, а забраться внутрь этого ящика и покопаться в его схеме нет никакой возможности. Скажем, ящик не поддается действию механических инструментов, которые находятся в нашем распоряжении, или в него нельзя заглядывать просто

по условиям игры. Снаружи имеется некоторое число «входов», куда можно подавать сигналы — определенные комбинации электрических токов, а также экран, на котором в ответ на любой «входной» сигнал появляется какой-то «выходной» сигнал, например, в виде графика поведения электрического тока.

Предположим теперь, что ни схема устройства, ни даже смысл подаваемых сигналов и ответов нам заранее неизвестны, а стоящая перед нами задача — выяснить схему работы ящика и установить природу сигналов.

Эта воображаемая ситуация неплохо отражает характер проблем, стоящих перед исследователями микромира. Роль исходного сигнала играют частицы, выпускаемые из ускорителя на мишень, роль ответного — те частицы, которые получаются в результате реакции. А само хитроумное устройство ящика — это конкретные механизмы взаимодействия между частицами, определяющие правила их поведения во всевозможных реакциях.

Приведенный пример обычно называют «черным ящиком»; название возникло в кибернетике. Для физики оно не совсем подходит, поскольку в физике представление о каком-то «черном» объекте связано с такой характеристикой: он способен все поглощать, но ничего не выпускает, во всяком случае, не отражает. Но дело, конечно, не в словах. Основная ценность такого примера в ясной демонстрации активности экспериментатора. На ящик можно глубокомысленно взирать, но никогда не постичь его устройства, если не воздействовать на его «входы» всеми доступными сигналами и не осмысливать их связи с ответами.

При исследовании частиц, в частности адронов, физики так и поступают: они воздействуют одними частицами на другие и пытаются выяснить строение самих частиц и природу сил, действующих между частицами.

Адроны особенно интересны в этом отношении. Они оказались первыми элементарными частицами, которые, в сущности, неэлементарны и обладают сложной внутренней структурой.

Как вы помните, начальные подозрения в неэлементарности адронов были связаны просто с обилием адронного мира. Весь опыт науки подсказывал, что если наблюдается множество различных объектов одного

класса, то они непременно должны быть составлены из гораздо меньшего количества более элементарных объектов. Такова, в сущности, атомистическая традиция, и она пока не подводила физиков.

Попытки свести все наблюдаемое многообразие адронов к каким-то более фундаментальным частицам привели к модели кварков, которая действительно позволяет «сконструировать» любой адрон из нескольких более простых частиц. Несмотря на то, что кварки не были выбиты из адронов, серьезных сомнений в составной природе сильно взаимодействующих представителей микромира у физиков нет.

Но вывод о том, что, скажем, протон составлен из трех кварков, еще не достаточен для полного понимания его структуры. Нужно знать закономерности сил, действующих между кварками, а также представлять себе дополнительные элементы структуры адрона. Нет ли внутри его каких-то иных объектов? Не потребуется ли дополнять чисто кварковую картину какими-либо новыми представлениями?

Важность вопросов такого типа хорошо видна на примере самых первых шагов в микромир. Как вы помните, открытие электрона сыграло решающую роль в постижении структуры атомов. Физики практически сразу осознали, что электроны — непременные составляющие атомов. Однако до тех пор, пока в резерфордовских экспериментах не было проведено прямое зондирование атомной структуры, об устройстве атомов существовали лишь более или менее правдоподобные догадки.

Нечто аналогичное произошло и в адронной физике. Попытки прямого зондирования структуры адронов были предприняты немедленно, как только в руках у исследователей оказались подходящие инструменты.

В 1956 году группа американских физиков под руководством Р. Хофстэдтера приступила к изучению взаимодействия электронов с нуклонами и дейтронами — атомными ядрами дейтерия. Пучок электронов с очень большой (по тем временам!) энергией до 0,6 ГэВ выводился на мишени из водорода или дейтерия. Электроны рассеивались протонами или дейтронами, состоящими из протонов и нейтронов, на некоторые углы относительно направления падения пучка, и физики непосредственно изучали распределение рас-

сеянных электронов по этим углам. Форма такого распределения и должна была дать информацию о строении адронов. В чем же заключалась идея опыта? Под какую модель он ставился?

Дело в том, что теория, а именно — квантовая электродинамика, считала, что электрон представляет собой совершенно бесструктурную, точечную частицу. Во всяком случае, при тех энергиях, при которых ставились опыты, никаких нарушений этого положения не должно было проявляться. Далее, согласно той же теории электрон должен был взаимодействовать с любым другим электрическим зарядом вполне определенным образом, обмениваясь фотоном.

В общем, электрон выступал в этом опыте как объект с достаточно хорошо известными свойствами. Поэтому с его помощью можно было четко выяснить и свойства других, возможно, более сложных объектов.

Если бы он взаимодействовал с такой же электрически заряженной бесструктурной частицей, то закономерности рассеяния можно было бы совершенно точно предсказать и на основе квантовой электродинамики. Иными словами, физики заранее знали, как будет выглядеть распределение рассеянных электронов, если адроны начисто лишены структуры, то есть являются точечными частицами. Имея определенный эталон для точечных адронов, физики вполне справедливо считали, что всякое отклонение от этого эталона окажется прямым доказательством существования структуры.

Конечно, теоретики имели и некоторые предварительные соображения о форме и размерах нуклонов и атомных ядер. Эти соображения основывались на многолетнем изучении ядерных сил в физике атомного ядра, на тех свойствах адронов, которые уже были известны из экспериментов по их взаимодействию и сводились к следующему.

Нуклоны взаимодействуют с большой интенсивностью. Взаимодействие между ними обусловлено обменом пи-мезонами. Следовательно, пи-мезоны испускаются и поглощаются нуклонами с большой вероятностью, гораздо большей, чем фотоны. Даже если нуклон «изолирован» от других адронов, он может испускать и тут же поглощать пи-мезоны, как бы взаимодействуя сам с собой. Такие пи-мезоны называются в и р т у а л ь н ы м и, и они могут отойти от нуклона не

очень далеко, на расстояние, не превышающее 10^{-13} сантиметра. Поскольку они испускаются очень часто, то вокруг нуклона образуется как бы пи-мезонное облако, а также и облака из других мезонов. Вокруг какого нуклона? Да того, который получился бы при полном выключении сильных взаимодействий, то есть точечного бесструктурного нуклона. В реальном мире такое выключение сделать нельзя, и поэтому нуклон всегда должен быть окружен мезонными облаками и как бы размазан по небольшому объему пространства.

Конечно, эти соображения носили лишь качественный характер — ведь настоящей теории ядерных сил не существовало! Однако они неплохо оправдались.

Эксперименты группы Р. Хофстэдтера показали, что протон и нейтрон обладают четко выраженной структурой. Нуклон не является точечной частицей, а представляет собой своеобразный сгусток какого-то особого вещества, размазанного по области с размером порядка 10^{-13} сантиметра. Энергия электронов в этих экспериментах как раз и позволяла заглянуть на такие расстояния и прощупать распределение электрического заряда во внешней оболочке нуклона.

Так сложная структура адронов была обнаружена экспериментально. Конечно же, сложное распределение электрического заряда было установлено для атомных ядер. Впоследствии прямые эксперименты позволили заглянуть и в пи-мезоны. У них тоже обнаружилась четко выраженная структура.

Хотя качественное представление о том, что электрон «видит» сложное распределение виртуальных мезонов, в основном справедливо, полное объяснение экспериментальных данных оказалось не столь уж простым делом. Фотоны пришлось наделять очень интересными новыми свойствами. Дело в том, что непосредственное взаимодействие между электрическими зарядами происходит только при обмене фотоном между ними. Но надо было считать, что фотон может на малую часть времени превращаться в особый тип мезонов и, следовательно, с некоторой вероятностью участвовать в сильных взаимодействиях.

Так была обнаружена структура адронов в электромагнитных взаимодействиях. Но еще сильней эта структура проявлялась во взаимодействиях между адронами.

При упругом рассеянии адронов друг на друге воз-

никает чрезвычайно сложная картина их распределения по углам рассеяния, ни в малейшей степени не напоминающая ту картину, которая появляется при взаимодействии точечных частиц. Это, конечно, и не удивительно — ведь теперь уже взаимодействует как бы два сгустка адронного вещества, два сложных структурных объекта.

Очевидные трудности в понимании картины адрон-адронного рассеяния связаны с тем, что ни одну из сталкивающихся частиц нельзя рассматривать как зонд с хорошо известными свойствами, как это делалось в случае электрон-адронного рассеяния.

Если бы физики имели возможность изучать структуру адронов единственным способом, сталкивая их с другими адронами, то они уподобились бы, скажем, древним эллинам, которым выдан неограниченный запас транзисторных радиоприемников и предложено изучить устройство этих вещей также единственным способом — сталкивая между собой приемники с возможно большей силой...

ГДЕ ПРЯЧУТСЯ КВАРКИ?

Итак, все эксперименты свидетельствовали в пользу сложной структуры адронов. Физикам стало ясно, что адроны выглядят как чрезвычайно плотные сгустки вещества с радиусом порядка 10^{-13} сантиметра. Однако до поры до времени зондирование адронной структуры проводилось не слишком глубоко. Грубо говоря, результаты экспериментов позволяли представить себе внешний слой адрона, но его внутренние области практически не были изучены.

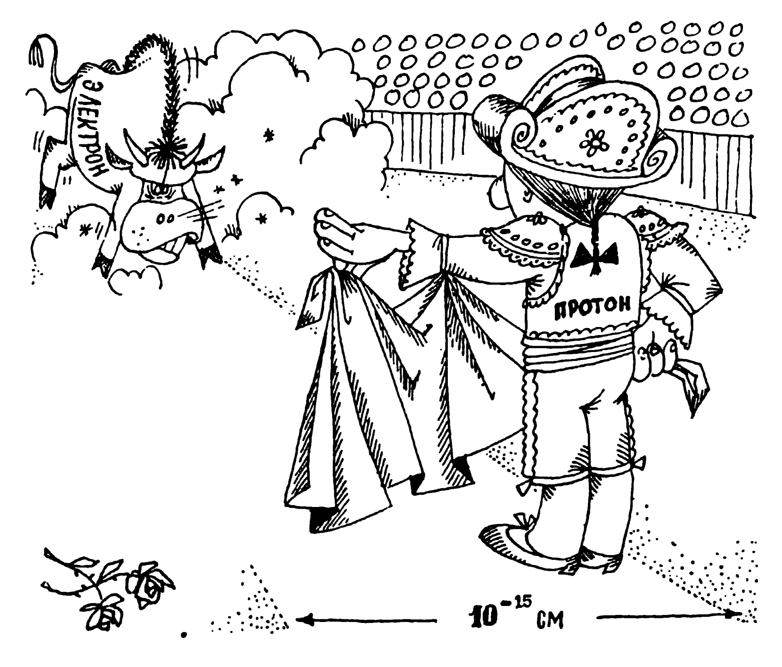
В 1968 году в небольшом калифорнийском городе Стэнфорде был запущен новый ускоритель электронов с энергией до 20 ГэВ. Несмотря на сравнительно скромное значение этой величины, по сравнению с параметрами протонных синхротронов, Стэнфордский ускоритель стал выдающимся достижением инженерно-физической мысли; ведь электроны ускорять значительно трудней, чем, например, протоны или атомные ядра. Дело в том, что электроны значительно легче протонов и гораздо активней теряют энергию на электромагнитное излучение, затрудняя тем самым процесс ускорения.

Новая установка позволяла заглянуть в адрон намного глубже, чем все предыдущие. Физики фактически впервые получили возможность непосредственно изучать процессы взаимодействия на расстояниях порядка 10^{-15} сантиметра, то есть в 100 раз меньших собственного размера адрона!

Конечно, исследователи были уверены, что столь уникальный инструмент для зондирования структуры принесет ценнейшую информацию. Но вряд ли они представляли себе, что самые первые эксперименты дадут совершенно обескураживающие результаты...

Сразу же после запуска ускорителя группа В. Панофского приступила к опытам, которые были задуманы как продолжение хофстэдтеровских работ. Пучок электронов, полученный в ускорителе, выводился на водородную мишень, и измерялось распределение провзаимодействовавших электронов по углам рассеяния и по энергиям.

При этом отбирались главным образом два типа событий: во-первых, случаи упругого рассеяния, в которых электрон передавал протону большой импульс, и,



во-вторых, акты, в которых электроны теряли не только большой импульс, но и большую энергию на рождение новых адронов.

С упругим рассеянием электронов на протонах все обстояло как нельзя лучше — новые экспериментальные данные просто продолжали ту же самую закономерность, которая была установлена еще в опытах Р. Хофстэдтера, и не показывали каких-либо резких изменений при переходе к меньшим расстояниям. Хотя характер распределения заряда в глубине протона оставался непонятным.

Зато акты неупругого соударения, в которых электроны передавали протонам большой импульс и теряли большую энергию на рождение новых адронов, выстраивались в крайне странную картину — протон как бы... терял структуру. Поведение наблюдаемых распределений становилось очень похоже на тот эталон, теоретическую формулу, которая была предназначена для описания взаимодействия точечных зарядов.

Получалось так, что в глубоко-неупругих процессах (так было названо рассеяние с передачей большого импульса и большой потерей энергии на образование новых адронов) электрон испытывал соударение с точечным зарядом. Противоречие?

Конечно, если только предположить, что электрон должен «видеть» структуру протона всегда одинаково независимо от ситуации. Но такая точка зрения неудовлетворительна даже в обычной повседневной жизни — восприятие структуры любого объекта или явления сильно зависит от нашего функционального взаимоотношения с ним. Простой пример. Зевака на перекрестке и мастер, копающийся в моторе, видят структуру автомобиля совсем по-разному: первый воспринимает общую форму, второй — отдельные детали.

В конечном итоге такого же типа различие должно было проявляться и при зондировании адронной структуры электронными пучками. Упругое рассеяние с не очень большой передачей импульса позволяло увидеть протон в целом, как единое образование. А вот глубоко-неупругие процессы, в которых возбуждались внутренние области протона и имело место частичное нарушение его целостности, вполне могли давать информацию об отдельных тонких деталях строения.

Любопытно, что о возможности резкого отклонения

от хофстэдтеровских результатов при переходе к неупругим реакциям еще в 1964 году писал академик М. Марков. Однако это замечание до поры до времени не находило должного отклика — большинство физиков все-таки надеялись, что адроны сохранят структуру рыхлого облака вплоть до самых малых расстояний.

В связи с результатами стэнфордских экспериментов немедленно возник вопрос: на чем же все-таки рассеивается электрон, неужели протон в глубоко-неупругих процессах выглядит как настоящая бесструктурная точка? Как теперь связать это представление с тем, что известно из прежних экспериментов по исследованию структуры адронов, которые ясно указывали на конечный, вполне определенный размер протона?

В 1969 году американский теоретик Р. Фейнман высказал простую (потрясающе простую!) гипотезу, что протон в глубоко-неупругих процессах предстает не в виде рыхлого облака, а как набор каких-то бесструктурных частиц, партонов (от английского: part — часть). Передавая протону большой импульс, электрон на самом деле испытывает рассеяние на отдельном партоне, а механизм этого рассеяния совершенно обычный — обмен квантом электромагнитного поля — фотоном. Отсюда ясно, что, по крайней мере, некоторая часть партонов обязательно должна нести электрический заряд.

Если при этом очень велика и теряемая электроном энергия, то партон выглядит как совершенно свободная частица, его связи с другими партонами внутри протона как бы рвутся.

Фотон, которым обмениваются электрон и партон, словно фиксирует моментальную фотографию глубокого строения протона. Время взаимодействия этого фотона с партоном намного меньше, чем характерное время взаимодействия самого партона с другими элементами протонной структуры. Поэтому фотон «видит» как бы застывшую картину — почти неподвижные партоны внутри протона.

После жесткого удара партон, получивший очень большой импульс за очень малое время — буквально это означает, что на него подействовала очень большая сила, — резко меняет направление движения, вызывает в протоне изрядную суматоху среди своих собратьев. Теперь протон практически не может сохранить целост-

ность, скорее всего он развалится на несколько «партонных пачек», которые и будут зарегистрированы как новые реальные адроны.

Напротив, в соударениях с малой передачей импульса отдельные партоны получают лишь слабые толчки, связи между ними не могут разорваться, и протон испытывает взаимодействие с электроном как нечто целое. В этом случае вероятность развала протона мала. Поэтому в таких соударениях партонная структура протона просто не видна. Чтобы почувствовать партоны, электрон должен непременно передать протону очень большой импульс, то есть пройти как можно ближе к центру протона. При этом он будет тем отчетливей видеть партоны как особые частицы, чем быстрее фотон успеет поглотиться партоном. Но для быстрого поглощения необходимо, чтобы электрон передал партону и достаточно большую энергию. Чем больше эта энергия, тем отчетливее получается «фотография» партонной структуры.

В сущности, это похоже на известное каждому фотолюбителю правило — нельзя получить хороший снимок, если характерный период движения объекта съемки того же порядка, что и время выдержки...

Качественно проявление партонной структуры очень напоминает картину прохождения электронного пучка не особенно большой энергии сквозь тонкую пленку вещества. Наблюдаемые при этом события четко делятся на два класса — большинство электронов рассеивается на чрезвычайно малые углы, лишь слабо отклоняясь от оси начального пучка, и только малая часть разлетается на сравнительно большие углы. Первый тип событий обусловлен многократными случайными соударениями с атомами, на которых теряется очень малая часть импульса. Во втором случае происходит резкое соударение с атомными электронами — именно здесь и проявляется зернистая структура вещества пленки.

Не лишним будет и напоминание о резерфордовских экспериментах по обнаружению атомных ядер. В сущности, именно те соударения альфа-частиц с ядрами, в которых передавались большие импульсы и альфа-частицы неизбежно отклонялись на большие углы, позволили увидеть ядерную структуру атомов.

Судя по этим аналогиям, экспериментальные результаты группы В. Панофского и их интерпретация

Р. Фейнманом означали прорыв к своеобразному субэлементарному уровню. Еще бы! Ведь обнаружены бесструктурные, а следовательно, скорее всего истинно элементарные (!) составные части адрона!

Это впечатление еще более укрепилось, когда советские теоретики В. Матвеев, Р. Мурадян и А. Тавхелидзе из Объединенного института ядерных исследований в Дубне показали, что партоны, вероятнее всего, являются кварками. Выяснилось, что не только в глубоконеупругом рассеянии электронов на адронах, но и в любом процессе, где адрону передается большой импульс, он (адрон) выглядит именно так, как этого требует кварковая модель. Барионы ведут себя в таких реакциях как система трех почти свободных кварков, а мезоны — как система из кварка и антикварка.

То, что именно кварки способны играть роль партонов — исходного строительного материала для адронов, — оказалось чрезвычайно полезным и глубоким представлением. Это представление вторглось и в такие, казалось бы, давно решенные проблемы, как структура атомного ядра.

Со школьной скамьи мы привыкли к тому, что ядро состоит из протонов и нейтронов. С другой стороны, поскольку каждый нуклон содержит три кварка, то ядра могут рассматриваться и как многокварковая система. Скажем, простейшее составное ядро — дейтрон — в большинстве ситуаций выглядит как связанное состояние протона и нейтрона, но в отдельных случаях его наверняка можно представлять как совокупность шести кварков. Эти сравнительно редкие состояния дейтрона и других ядер были открыты экспериментально. Пытаясь передать ядру очень большой импульс, электрон видит его как совокупность кварков, число которых в три раза превышает число нуклонов в этом ядре.

Теперь уместно немного приостановить нашу экскурсию в глубь адронов и разобраться с явно назревшим вопросом: сколько же существует картин строения представителей этого обширнейшего семейства микромира и как эти картины связаны между собой?

Во всех известных реакциях каждый адрон может быть представлен как определенная комбинация двух (мезоны) или трех (барионы) кварков. Опираясь на такую простую кварковую картину, можно составить все известные адроны с правильными значениями всех заря-

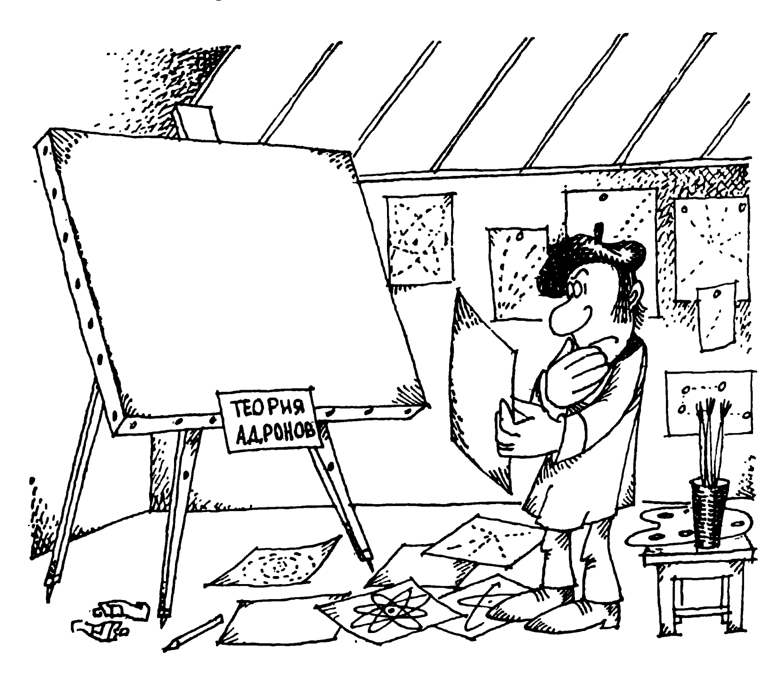
дов — электрического, барионного, «странности» и др. — и объяснить многие важные закономерности взаимодействия между частицами.

С другой стороны, в адроне присутствуют некоторые бесструктурные чрезвычайно малые частицы — партоны. На основе партонной картины хорошо объясняются закономерности глубоко-неупругого рассеяния, рассеяния адронов с большой передачей импульса, в общем, все те процессы, где исследователи пытаются заглянуть во внутренние области сильновзаимодействующих частиц.

И наконец, в процессах взаимодействия, где адронам передается относительно небольшой импульс, они выглядят как размазанные по области размером 10^{-13} сантиметра сгустки вещества.

Итак, перед нами три картины строения одного и того же объекта — адрона. Эти картины, казалось бы, настолько различны, что может возникнуть подозрение — не противоречивы ли они? Насколько согласуются между собой различные представления об адронах?

На этот вопрос пока не существует окончательного



ответа. Ведь мы не знаем еще, как выглядит полностью удовлетворительная теория адронов, а только такая теория будет способна согласовать между собой все известные из опыта данные, превратить множество отдельных набросков в полную картину строения частиц.

Однако само по себе сильное различие в трех картинах адронной структуры не служит основанием для каких-то противоречий между ними. Ведь представления о кварковой и партонной структуре и об адроне-облаке первоначально были развиты на основе несколько разных экспериментов и являются как бы разными проекциями одного объекта.

Скажем, профессиональный фотограф способен снять какой-либо предмет совершенно различным образом, так что почти никто и не догадается, что на двух фотографиях запечатлен, например, один и тот же мотоцикл. В одном случае обычная «Ява» будет похожа на себя, а в другом — на техническое чудо внеземной цивилизации. Все дело, как говорится, в ракурсе...

Современная точка зрения на структуру адронов сводится к тому, что все три картины их строения, в принципе, могут быть согласованы.

Попробуем теперь несколькими штрихами набросать ту приближенную схему, которую можно было бы назвать «адрон в разрезе». Для определенности будем говорить о протоне.

Итак, начнем с внешней оболочки. Она наиболее плотная и состоит из множества виртуальных мезонов. Эти мезоны непрерывно рождаются и гибнут и создают нечто вроде пульсирующего облака размером около 10^{-13} сантиметра. Наряду с мезонами и несколько глубже их могут существовать более тяжелые виртуальные частицы, скажем, пары протон — антипротон и т. д.

Если перенестись сразу к центру адрона, то там мы обнаружим три кварка — два пэ-кварка и один эн-кварк, которые обеспечивают определенное зарядовое состояние протона. Как вы помните, его электрический и барионный заряды равны плюс единице каждый, а «странность» равна нулю.

Таким образом, внешняя оболочка из виртуальных адронов полностью нейтральна — ее электрический, барионный и прочие заряды должны быть в среднем равны нулю, чтобы не нарушать привилегии кварков, которые и определяют величины наблюдаемых зарядов.

Эти три кварка в центре протона часто называют валентными именно потому, что они полностью задают заряды протона и определяют тем самым многие «правила игры», то есть ряд закономерностей, которым следует протон, взаимодействуя с другими частицами.

Такая аналогия заимствована из химии, где валентность атомов задает основные законы химических реакций. Правда, данной аналогией не стоит особенно увлекаться. В химии валентность связана просто с числом электронов во внешней оболочке атомов. Скажем, натрий (Na) имеет во внешней оболочке один электрон и активно стремится ее заполнить еще семью электронами. Поэтому он охотно вступает в контакт с хлором (Cl), имеющим во внешней оболочке как раз семь электронов. В результате соединения у атомов натрия и хлора образуется как бы единая внешняя оболочка из восьми электронов, а мы благодаря этим электронным правилам получаем необходимый продукт — поваренную соль (NaCl).

Пока неизвестно, образуются ли настоящие кварковые молекулы, то есть существуют ли элементарные частицы, состоящие из нескольких кварковых атомов. Скажем, если протон рассматривать как трехкварковый атом, тогда атомные ядра, состоящие из протонов и нейтронов, в определенном смысле можно считать кварковыми молекулами. Как вы помните, например, дейтрон в некоторых случаях ведет себя как шестикварковая система.

Однако в одном отношении химическая аналогия, несомненно, полезна. Раз есть валентные кварки, значит, должны быть и какие-то невалентные!

Действительно, наряду с тремя кварками, определяющими все заряды протона, необходимо ввести в нашу картину еще множество кварков и антикварков, которое так и называют — кварковым морем. Кварковое море формирует свою оболочку, которую условно можно поместить между внешней, состоящей из виртуальных адронов, и центральной областью, где заключены валентные кварки. В этой же оболочке находятся глюоны — переносчики взаимодействия между кварками.

Разумеется, кварковое море и внешняя оболочка должны быть в целом полностью нейтральны — ведь все зарядовые свойства протона определяются именно валентными кварками.

Необходимость в промежуточной оболочке связана с простыми соображениями, следующими из теории относительности. Как вы помните, мы не можем утверждать просто, что «протон состоит из трех кварков» — это лишь удобная форма представления о его зарядах. Протон с определенной вероятностью может включать в себя не только три валентных кварка, но и сколь угодно большое количество кварк-антикварковых пар. Если бы рождались реальные кварки, то из протона можно было бы выбивать не обязательно три, но и пять, семь и более кварков, лишь бы при ударе выделялась достаточно большая энергия.

Теперь на основе трехслойной структуры — виртуальные адроны, кварковое море, валентные кварки — получается довольно логичная картина протона.

Валентные кварки играют роль тех самых партонов, которые видны электрону, пытающемуся проникнуть в самую сердцевину протона. Электроны, которые проникли не столь глубоко, могут рассеиваться на кварках-партонах из кваркового моря. Если же электрон только скользит по поверхности протона, он чувствует только внешнюю оболочку из виртуальных адронов и естественно, что протон предстает перед ним как рыхлое облако определенных размеров.

Нечто подобное происходит и при рассеянии протонов друг на друге. Если они пролетают на достаточно большом расстоянии (между центрами!) друг от друга, то взаимодействуют главным образом внешними оболочками и при этом формируются довольно сложные закономерности рассеяния «размазанных» объектов. Если же протоны испытывают лобовой удар и буквально вынуждены пройти друг сквозь друга, то непременно сталкиваются их валентные кварки, а сами они разлетаются на большие углы, следуя за своей кварковой сердцевиной.

Нарисованная схема устройства протона, конечно очень упрощена, но, как вы видите, она помогает связать единым образом различные структурные представления о нем.

Эта схема полезна и еще в одном отношении. Обратите внимание, что по мере движения из внутренних областей адрона во внешние мы встречаем все более усложняющиеся частицы.

Если в центре протона находятся три бесструктурных кварка, то следующая промежуточная оболочка включает в себя множество кварков, которые могут образовывать всевозможные комбинации: пары кварк — антикварк, тройки кварков и антикварков. Это, в сущности, кварковые атомы — сердцевины возможных адронов.

Между кварковым морем и внешней оболочкой виртуальных адронов, конечно, не существует резкой границы. Видимо, условное пограничье между морем и внешней оболочкой определяется тем, что большинство морских кварков (физики так и называют кварки из моря!) комбинируются в зародыши будущих частиц, своеобразные кварковые атомы. Виртуальные адроны из внешней оболочки уже обладают каждый своими зарядами, то есть кварковой сердцевиной. Скажем, всякий виртуальный мезон можно рассматривать как комбинацию кварка и антикварка, а каждый виртуальный барион — как комбинацию из трех кварков.

Более того, каждая виртуальная частица из внешней оболочки протона, видимо, успевает обзавестись и собственным кварковым морем (по крайней мере, собственным озером). Поэтому она ведет себя почти как реальная частица, но, чтобы стать по-настоящему реальной, она должна получить энергию извне. Именно это и происходит в результате соударения, например, двух протонов — в среднем половина энергии столкновения уходит на образование новых адронов. Эта энергия в основном и расходуется на формирование реальных частиц.

Итак, получается, что во внешней оболочке протона свободные кварки практически отсутствуют, хотя в центре нет ничего, кроме кварков. Видимо, законы взаимодействия кварков устроены таким образом, что сами кварки просто не могут поодиночке выходить наружу. Например, очень велика вероятность того, что кварк, попытавшийся вырваться из адрона самостоятельно, просто будет захвачен и увлечен в кварковое море одной из частиц внешней оболочки. Оказывается, что эта вероятность велика настолько, что отдельный кварк не способен пройти без захвата расстояние порядка размера протона, то есть не может выскочить наружу в виде реальной частицы.

Вот как хитро может быть устроена «адронная тем-

ница» для кварков! Кварк словно мощной резиновой лентой привязан к другим кваркам.

Действительно, валентные кварки практически движутся свободно в центре адрона. В кварковом море взаимодействие между ними тоже не очень сильно. Но оно резко усиливается, когда какой-либо кварк пытается отойти от других на большое расстояние. Силы, действующие между кварками, могут стать столь же большими, как и силы, действующие между адронами, если не больше! И такой кварк просто не сможет прорваться сквозь плотную среду виртуальных адронов внешней оболочки.

Теперь длительный неуспех в поисках реальных кварков может показаться не столь уж удручающим. Они могут быть полностью или почти полностью заперты в адронах и тем не менее рассматриваться... как реальные частицы.

Нет ли здесь противоречия? Как можно считать реальными частицы, которые не то что не оставляют следов, но и вообще не способны выделиться в чистом виде? Что за необычные силы могут действовать между кварками?..

И вправду, накопилось множество вопросов, которые связаны с новыми представлениями, сформировавшимися в физике буквально за последнее десятилетие. Пора обсудить, что же нового мы можем сказать сегодня о законах сил, действующих между частицами, и о том, какие частицы и в каком смысле следует считать реальными...

ЧТО ДЕЛАТЬ С ЭТАЛОНАМИ И АНАЛОГИЯМИ?

Итак, основная проблема связана с пониманием природы сил, действующих между частицами и внутри частиц.

Современная физика имеет дело с четырьмя различными типами взаимодействия, которые резко отличаются по интенсивности — сильными, электромагнитными, слабыми и гравитационными. Начнем с конца.

Гравитационные взаимодействия определяют структуру планетных систем, галактик и, видимо, вселенной в целом, но в микромире они практически не заметны. Во всяком случае, считается, что на данном этапе ис-

следования процессов с элементарными частицами этими силами можно пренебречь.

Три остальных типа взаимодействия, несомненно, играют существенную роль в устройстве микромира, но до настоящего времени ни одно из них не получило последовательной и удовлетворительной теоретической трактовки. Причины такого положения дел очень интересны и отнюдь не лежат на поверхности.

В каждый период развития физики формировался определенный эталон в понимании механизма взаимодействия.

До недавнего времени таким эталоном в физике микромира, несомненно, была квантовая электродинамика — квантовая теория взаимодействия элементарных электрических зарядов с электромагнитным полем. Эта теория приобрела несколько выделенное положение отчасти по наследству благодаря хорошему развитию классической электродинамики.

Сильные и слабые взаимодействия элементарных частиц были открыты и подверглись глубокому исследованию значительно позже, чем электромагнитные. Поэтому естественно, что именно электродинамика стала первым своеобразным эталоном для построения любой другой теории.

Взаимодействие согласно квантовой электродинамике осуществляется при испускании или поглощении квантов электромагнитного поля — фотонов — электронами или другими электрически заряженными частицами. Таким образом, в простейшем случае взаимодействие между двумя заряженными частицами происходит за счет обмена фотоном. В принципе возможен обмен и не одним, а двумя, тремя и бо́льшим количеством фотонов, но такие процессы будут менее вероятны. Вероятность испускания каждого фотона приближенно характеризуется безразмерной величиной, которая равна отношению квадрата элементарного электрического заряда (e) к произведению постоянной Планка (h) на скорость света (c):

$$\alpha = \frac{e^2}{hc} \approx \frac{1}{137}.$$

Эта чрезвычайно важная физическая величина часто называется *константой связи* электромагнитных взаимодействий.

Тот факт, что она мала по сравнению с единицей, значительно облегчает все расчеты в квантовой электродинамике и упрощает конкретные модели тех или иных процессов. Благодаря малости константы связи теоретикам удалось построить хорошие методы расчета различных наблюдаемых характеристик электромагнитных взаимодействий, и их результаты на сегодняшний день превосходно согласуются с экспериментальными данными.

Казалось бы, если есть такое согласование, то все хорошо. Но теоретики на этом не остановились — они решили проверить, сохранится ли столь приятная картина и в дальнейшем, то есть при переходе к сколь угодно малым расстояниям, на которых происходит взаимодействие. Исследуя эту проблему, советские физики Л. Ландау, И. Померанчук и другие пришли к неутешительному выводу, что квантовая электродинамика в ее современной форме вообще неприменима к описанию процессов, происходящих с участием бесструктурных точечных электронов на очень малых расстояниях. Конкретно их результаты сводились к весьма парадоксальному положению: при попытке описать поведение зарядов и квантов электромагнитного поля в очень малых областях пространства оказывалось, что взаимодействие на больших расстояниях... исчезает!

Конечно же, этот факт противоречит известным результатам наблюдений и должен рассматриваться как своеобразный способ доказательства «от противного», доказательства того, что электродинамика не является полностью удовлетворительной теорией и должна быть существенно изменена для описания процессов при очень высоких энергиях и на очень малых расстояниях. В чем же суть полученных противоречий?

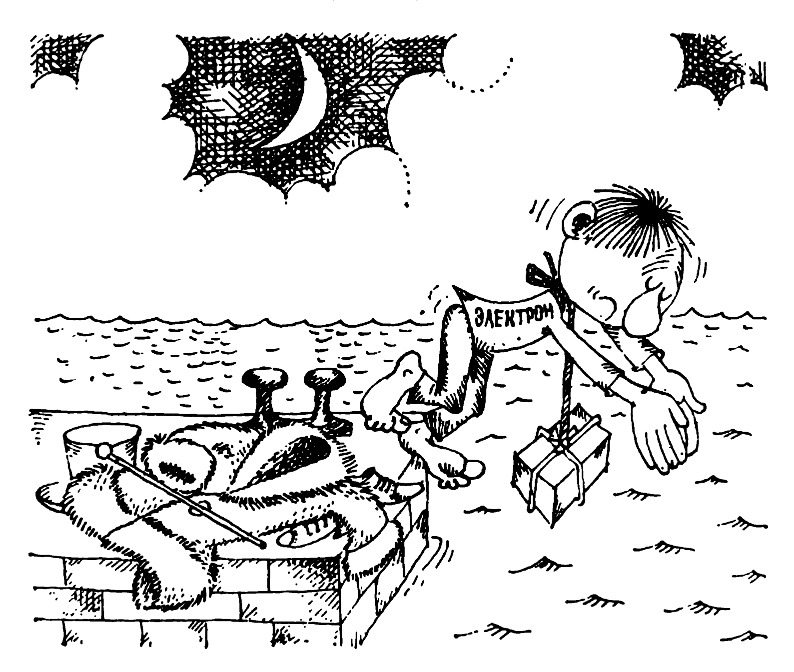
А в том, что представления электродинамики требуют рассмотрения особого типа объектов — виртуальных частиц.

Виртуальные частицы обычно имеют те же названия, что и реальные, скажем, фотоны или электроны, но обладают одним важным свойством, отличающим их от реальных частиц, — они испускаются и поглощаются непосредственно в микроскопически малой области взаимодействия и никогда не вылетают наружу и не регистрируются макроскопическими приборами. Скажем, электрон в процессе движения может как бы взаимо-

действовать сам с собой, испуская и тут же поглощая фотоны. В свою очередь, фотон может превратиться в пару, состоящую из электрона и позитрона, которые сразу же, вслед за образованием, снова аннигилируют, превращаясь в фотон.

Благодаря этим процессам реальный электрон должен непрерывно излучать и поглощать фотоны: он словно одевается в своеобразную «шубу» из виртуальных фотонов и электрон-позитронных пар. Чем глубже мы пытаемся проникнуть к центру электрона, тем более плотной становится его «шуба». На достаточно больших расстояниях электрон выглядит как точечный объект, несущий определенный электрический заряд. Но когда мы попытаемся узнать заряд «голого» электрона, без всякой «шубы» из виртуальных частиц, то есть настоящего точечного электрона, то окажется, что этот заряд бесконечно большой.

Такое положение крайне неудовлетворительно. Ведь физика всегда имела дело с зарядами, обладающими конечными — пусть очень большими, но конечными! — значениями. А тут получается совершенно непро-



емлемое бесконечное значение. Можно ли избежать этой неприятности?

Оказывается, можно, но весьма дорогой ценой. Можно просто считать, что электрический заряд «голого» электрона, для которого как бы не существует взаимодействия с фотонами, имеет конечное значение. Но тогда неизбежно получается, что заряд реального электрона вообще должен быть равен нулю и тогда он не сумеет взаимодействовать с фотонами и другими зарядами. Такая картина формально допустима, но она противоречит известному факту — реальные электроны все-таки имеют заряды.

Итак, в любом случае — конечен заряд «голого» точечного электрона или бесконечен — мы приходим к неприемлемой картине.

Несмотря на довольно сложный характер теории, причина всех трудностей довольно проста и наглядна.

Обсудим следующий пример. Пусть в вещество, где существует равное количество положительных и отрицательных зарядов, вводится новый, скажем для определенности, отрицательный заряд. При этом равновесие между различными зарядами вещества, конечно, нарушится. Новый заряд начнет притягивать к себе заряды противоположного знака, то есть положительные. Постепенно вблизи него будут накапливаться положительные заряды, в конце концов он окажется как бы заэкранированным и его действие на остальные заряды вещества практически прекратится.

Нечто подобное происходит и с «голым» электроном. Веществом, которое его экранирует, являются как раз виртуальные частицы, которые неизбежно появляются при учете взаимодействия. Квантовая электродинамика позволяет оценить эффективность этой экранировки, и оказывается, что заряд экранируется бесконечно сильно! Поэтому неудивительно, что, приписав «голому» электрону конечный электрический заряд, мы приходим к выводу, что этот заряд полностью экранируется «шубой» реального электрона, который и должен наблюдаться на опыте. И получается неприятный результат — этот реальный электрон должен выглядеть как частица с нулевым электрическим зарядом!

Чтобы прорвать бесконечно сильную экранировку, разумеется, необходимо приписывать «голому» электро-

ну бесконечно большой заряд, что, как мы уже видели, тоже неудовлетворительно.

Вот с такими трудностями пришлось столкнуться теоретикам при попытке проверить применимость квантовой электродинамики к описанию процессов в сколь угодно малых областях пространства. Эти трудности и заставили их искать новый подход к описанию взаимодействий на малых расстояниях.

Но, прежде чем было достигнуто такое понимание проблемы, теоретики успели проделать довольно большую работу по построению моделей слабых и сильных взаимодействий по образцу квантовой электродинамики.

Как вы помните, первой моделью слабых взаимодействий оказалась теория бета-распада, предложенная Э. Ферми. Согласно этой теории нейтрон трансформировался в протон, излучая пару: электрон и антинейтрино. Э. Ферми в значительной степени исходил из аналогии с квантовой электродинамикой, но в его теории место фотона как бы занимала пара, состоящая из лептона и антилептона. Впоследствии его идея была расширена и позволила описать все распады сравнительно долгоживущих частиц как проявление некоторого универсального слабого взаимодействия.

Характерной особенностью этой теории является следующее представление: четыре частицы — барионы или лептоны — непременно взаимодействуют в одной точке, то есть в непосредственном контакте друг с другом. С помощью такого представления можно описать и распады частиц, и их рассеяние. Скажем, отрицательно заряженный мюон способен распадаться на электрон и пару, состоящую из электронного антинейтрино и мюонного нейтрино. В данном случае взаимодействие выглядит как контакт четырех лептонов. Это же представление позволяет описать и другой процесс, например, столкновение мюона с электронным нейтрино. В результате этого столкновения должны образоваться электрон и мюонное нейтрино.

В случае бета-распада взаимодействие выглядит как контакт двух барионов и двух лептонов. И опять на основе этого же представления можно было описать другие типы процессов, например, рассеяние электронного нейтрино на нейтроне, в результате которого возникал протон и электрон.

Обратите внимание на то, что в обоих случаях описание рассеяния возникает четкая закономерность превращения заряженных частиц в незаряженные и наоборот. Заряженный мюон трансформируется в мюонное нейтрино, а электронное нейтрино — в электрон. Или: нейтрон трансформируется в протон, а электронное нейтрино — опять-таки в электрон.

Такая же закономерность наблюдается и во всех остальных известных процессах слабого взаимодействия. Отсюда и родилась интересная гипотеза: а не осуществляется ли слабое взаимодействие за счет обмена особым квантом, который как бы переносит заряд при взаимной трансформации заряженных и нейтральных частиц.

Гипотетическая частица, которую называют дубль-вэ-мезоном, или дубль-вэ-бозоном, должна быть очень тяжелой — в несколько раз тяжелее протона — и нести положительный или отрицательный электрический заряд.

А как быть в том случае, когда слабое взаимодействие осуществляется без переноса какого-либо заряда, например, когда нейтрино упруго рассеивается на электроне? Такого типа события долгое время вообще не наблюдались, но недавно было установлено, что они все-таки происходят.

Механизм такого взаимодействия может быть обусловлен еще одной гипотетической частицей зэт-мезоном (или зэт-бозоном), не несущей электрического заряда.

Если гипотетические частицы дубль-вэ- и зэт-мезоны будут открыты, то картина слабых взаимодействий станет очень похожа на электродинамическую картину. Существенная разница между ними будет обусловлена лишь различными свойствами этих мезонов и фотона. Действительно, масса фотона равна нулю, из-за этого электромагнитные взаимодействия обладают бесконечным радиусом действия. Гипотетические же переносчики слабых взаимодействий должны иметь очень большие массы, и поэтому радиус действия слабых сил должен быть очень мал, по-видимому, не более 10^{-15} сантиметра. Кроме того, фотон нейтрален, а дубль-вэ-мезоны способны нести заряд.

То, что эти частицы еще не открыты, связывается обычно с большой величиной их массы. Пока слабые

взаимодействия, которые в чистом виде можно исследовать только с помощью нейтринных пучков, изучались в недостаточно широком интервале энергий, и в будущем мы можем надеяться на открытие дубль-вэ- и зэт-частиц.

К сожалению, модели слабого взаимодействия с гипотетическими мезонами или без них оказались еще хуже того образца, по которому они строились. В этих моделях вообще нельзя было последовательно описать процессы с участием виртуальных частиц. И такое положение в теории слабых взаимодействий сохранялось до недавних пор.

По аналогии с квантовой электродинамикой пытались строить и теорию сильных взаимодействий. Как вы помните, первоначальная идея Х. Юкавы состояла в том, что сильные взаимодействия осуществляются при испускании и поглощении пи-мезона. Пи-мезон должен был играть такую же роль, что и фотон в электродинамике. Впоследствии, после открытия ка-мезонов и резонансов, эта идея несколько расширилась, но оказалась все равно не слишком последовательной.

Беда в том, что интенсивность сильных взаимодействий примерно в 1000 раз больше, чем электромагнитных, то есть константа связи типа «альфа» в данном случае больше единицы. Из-за этого получалось так, что все неприятности, которые в электродинамике были спрятаны на фантастически малых расстояниях, теперь уже должны были проявиться на расстояниях, вполне доступных эксперименту.

Расчеты по «квантовой мезодинамике» — так называлась квантовая теория взаимодействия мезонов и нуклонов — не объясняли наблюдаемых закономерностей. С другой стороны, экспериментальные работы по физике сильных взаимодействий развивались в послевоенный период чрезвычайно быстро. Ведь именно сильные процессы наиболее удобны для наблюдений — у них очень высокая интенсивность, и подавляющее большинство событий, возникающих при падении пучка ускоренных протонов на мишень, как раз и происходит за счет сильных взаимодействий. Неуспех электродинамики в качестве эталона теорий породил стремление к созданию новых идей, неизвестных физике прошлого.

В начале 60-х годов некоторые физики выступили с весьма красивой и необычной программой «ядерной де-

мократии». Пожалуй, наиболее активным сторонником этой программы оказался американский теоретик Дж. Чью, ученик Э. Ферми, сделавший очень много для ее развития и разъяснения основных ее путей.

А идеи эти были таковы. Среди адронов нет выделенных частиц; все они равноправны, неэлементарны и представляют собой просто различные состояния адронной материи.

В этом пункте идеи «демократии» наблюдаемых адронов полностью согласовывались с точкой зрения сторонников, скажем, кварковой модели, которые тоже считали адроны неэлементарными и равноправными. Но в дальнейшем пути расходились. Настоящая «ядерная демократия» отвергала всякие попытки представить адроны как различные «кварковые атомы».

Общая философия Дж. Чью и многих других физиков, разделявших его позиции, состояла в том, что эпоха безграничного атомизма кончилась, и гипотезы атомоподобного устройства адронов следует сдать в архив. Основной базой служил, разумеется, простой факт — раз никаких составляющих частей, субэлементарных частиц или кварков ни в одном из многочисленных опытов выделить не удалось, то имеет ли смысл в таком случае говорить об устройстве адронов из каких-то особых привилегированных частиц? Не проще ли считать, что адронная часть микромира основана на демократических принципах, то есть реальные адроны как бы сами устанавливают законы своего бытия?

В положительном ответе на этот вопрос и заключалась главная идея нового подхода к построению адронов. Они должны реализоваться в природе такими, как мы их наблюдаем, за счет определенных сил, обусловливающих их существование. Но так как эти силы, в свою очередь, проявляются в процессах рассеяния адронов, то переносчиками этих сил опять-таки являются сами адроны. Если на основе такого представления удалось бы правильно рассчитать все параметры адронов — массы, времена жизни — и правильно описать их поведение в различных реакциях, то, конечно, не потребовалось бы никаких дополнительных идей и теорий о внутренней их структуре, в частности о кварках.

Самое интересное состоит в том, что на ряде частных примеров теоретикам удалось показать, что суще-

ствование отдельных частиц действительно взаимообусловлено. Такая процедура получила название бутстрэп (по-русски — просто зашнуровка). Адроны как бы шнуровали друг друга, заставляя появляться нужные для собственного существования другие адроны именно с теми значениями масс, которые и наблюдались на опыте.

Очень важно, что в этом подходе унитарные симметрии получали естественное толкование. Отдельные группировки частиц (по 8 и по 10) оказывались опять-таки взаимосогласованными. Таким образом, симметрия возникала как определенное следствие характера сил, действующих между адронами. И никаких кварков для ее объяснения вроде бы и не требовалось.

Идеи «ядерной демократии» и зашнуровки сыграли весьма положительную роль, хотя и не привели к построению полной теории сильных взаимодействий.

Эти идеи столкнулись с трудностями и внешними и внутренними.

Внешние нарушали традицию, полностью отвергая методы квантовой теории поля. Поэтому заведомо в



схему нового подхода нельзя было вписать ни фотон, ни лептоны.

Что же касается внутренних проблем этого подхода, то они как раз и привели к его постепенному отступлению. Дело в том, что свойства адронов нельзя вывести, только изучая закономерности реакций между ними при низких энергиях. Если же учитывать и закономерности реакций при высоких энергиях, то ситуация резко усложняется. Скажем, основную роль начинают играть процессы множественного рождения адронов, и тут приходится искать совершенно новые пути описания...

Но, конечно, решающей трудностью для программы всеобщей зашнуровки адронов оказались эксперименты по зондированию глубоких областей адрона. Партоны не были предусмотрены чисто «демократической» теорией. На ее основе было бы понятно, если бы адроны продолжали оставаться рыхлой облакообразной структурой вплоть до самых малых расстояний. В той картине устройства протона, которую мы обсуждали в предыдущем разделе, это соответствовало бы существованию одной-единственной внешней оболочки, которая заполнила бы собой весь объем протона!

Что делать, природа хитрей наших самых хитроумных проектов...

Однако в некоторых отношениях идеи «ядерной демократии» оказались, безусловно, полезны. Именно в борьбе с кварковой моделью сторонники нового подхода четко выяснили, что реальные кварки, если бы они были найдены, принесли бы теоретикам не только радость, но и множество трудностей. Они оказались бы опять-таки сложными адронами со всеми вытекающими отсюда последствиями. И снова возник бы вопрос: а из чего состоят кварки?

Это заставило сторонников кварковых моделей активно исследовать возможности запирания кварков — надо ведь как-то объяснить отсутствие их на опыте! И согласитесь, что протон как «кварковый атом» выглядит весьма необычно — вовсе не так, как его представляли себе во времена первых составных моделей. На структуру обычного знакомого нам атома, состоящего из ядра и вращающихся вокруг него электронов, эта картина похожа очень мало — вроде бы атом, но вывернутый наизнанку...

В общем, если говорить о какой-то единой атомисти-

ческой концепции, то приходится признать, что она испытала за последнее десятилетие стремительное развитие.

Быть может, допуская некоторое преувеличение, стоит отметить, что «атомарное» устройство протона примерно настолько же сложнее атома Бора, насколько атом Бора сложней атома Демокрита. Это замечание, конечно, не связано с определением какой-то строгой геометрической пропорции между сложностью конкретных физических моделей. Но оно могло бы вызвать такое недоумение — ведь Демокритов атом рассматривался еще в доньютоновскую эпоху, и его структура представлялась в чисто механических образах, причем законы механики еще не были как следует поняты, не были известны фундаментальные силы... Атом Бора как модель возник уже через двести лет после создания новой физики, когда были известны и законы механического движения, и закон Кулона для силы взаимодействия между электроном и ядром, причем законов обычной механики для описания атома оказалось недостаточно... Неужели кварковая структура протона вносит существенно новые моменты в современную теорию?

В том-то и дело, что вносит! И пока мы еще далеко не полно представляем себе всю новизну положения. Но два момента в этой ситуации уже можно четко отметить.

Во-первых, мы вынуждены вводить в рассмотрение особый класс реальных объектов: кварки-партоны. Эти объекты, как мы их понимаем в настоящее время, совершенно необычны и не имеют предшественников в физике. Они являются элементами структуры адронов, но не могут быть выделены в качестве отдельных частиц, подобно другим элементарным частицам. Можно ли их все-таки считать реальными объектами? Это, как вы помните по обсуждению реальности резонансов, в известном смысле вопрос договоренности. Ведь и резонансы в свое время мы считали чем-то менее фундаментальным, чем стабильные адроны и не очень-то спешили объявить их особым типом элементарных частиц.

Кварки-партоны не способны оставить макроскопический след в веществе, подобно протону или пи-мезону; они не приводят и к таким перераспределениям наблюдаемых следов, как известные резонансы. В этом смыс-

ле они ненаблюдаемы и вряд ли будут наблюдаться в будущих экспериментах.

Однако кварки-партоны можно «увидеть» с помощью частиц, обладающих только слабыми и электромагнитными взаимодействиями. Эти частицы — фотон, нейтрино, электрон, мюон — способны проникнуть сквозь внешние оболочки адрона и провзаимодействовать непосредственно с его «кварковым атомом». Более того, один адрон тоже способен «увидеть» структуру другого адрона при взаимодействии на малых расстояниях, когда валентные кварки непосредственно рассеиваются друг на друге.

В отличие от других частиц кварк-партон не должен иметь определенного значения массы — это в высшей степени нестабильное образование. Его масса может иметь совершенно произвольное, случайное значение, зависящее от условий, в которых он находится.

Это не столь уж и удивительно, если учесть, что только у абсолютно стабильных частиц масса определена абсолютно точно. У некоторых короткоживущих резонансов погрешность в определении массы достигает 10 и более процентов. По-видимому, в случае кварков-партонов мы имеем дело с объектами, у которых погрешность в определении массы практически достигает 100 процентов и о какой-то одной определенной массе их говорить не имеет смысла. Единственные четко определенные величины, которые можно приписать кваркам-партонам, — различные заряды. В этом плане они как бы определены по одному свойству: иметь определенные электрический, барионный заряды, «странность» и «очарование».

Во-вторых, силы, действующие между кварками-партонами, весьма необычны. Они должны не убывать с ростом расстояния между ними, а, наоборот, возрастать. Такое представление противоречит привычным для нас понятиям о фундаментальных силах, которые известны уже давным-давно из теории тяготения и из электродинамики. Со школьных лет мы знаем, что закон Ньютона для тяготеющих масс и закон Кулона для взаимодействующих зарядов определяют силы, которые обратно пропорциональны квадрату расстояния между частицами. Еще быстрее убывают с ростом расстояния слабые и сильные взаимодействия между частицами, силы, открытые уже в нашем веке.

На малых расстояниях все эти силы чрезвычайно велики и становятся бесконечно интенсивными в пределе нулевых расстояний, то есть при непосредственном контакте точечных частиц.

Такое представление о характере фундаментальных сил стало своеобразным эталоном, и во многом благодаря успехам квантовой электродинамики. Но, как вы помните, сама квантовая электродинамика оказалась непригодной при исследовании процессов взаимодействия на малых расстояниях.

Поэтому физики стали активно искать новый эталон квантовой теории, который можно было бы использовать в таких условиях, когда электродинамика становится непригодной.

Еще в 1954 году американские теоретики Ч. Янг и Р. Миллс заинтересовались такой проблемой: что будет, если, скажем, изотопическая симметрия между протоном и нейтроном выполняется в каждой точке пространства и в каждый момент времени? Оказалось, что для соблюдения такой симметрии необходимо, чтобы существовало особое к а л и б р о в о ч н о е п о л е, кванты которого и позволяют переносить взаимодействие между почти сохраняющимися зарядами — изотопическими спинами. Это калибровочное поле играло для указанного заряда примерно ту же роль, что электромагнитное поле — для электрического заряда.

Общая идея состояла в том, что любому точно или приближенно сохраняющемуся квантовому числу можно сопоставить определенное калибровочное поле, подобно тому, как сохраняющемуся электрическому заряду можно сопоставить электромагнитное поле. В сущности, физики хотели устранить явное неравноправие в семействе сохраняющихся квантовых чисел — зарядов. Ведь электрический заряд выступает как бы в двух ролях одновременно — он, во-первых, сохраняется и, во-вторых, характеризует собой определенное взаимодействие. Не является ли электромагнитное поле простейшим частным случаем калибровочных полей и нельзя ли каждому сохраняющемуся квантовому числу придать дополнительную роль заряда, взаимодействующего со своим особым калибровочным полем?

Такие вопросы встали перед физиками. В процессе более чем 20-летнего исследования различных калибровочных полей они и столкнулись с интересным явле-

нием. Оказалось, что калибровочные поля, обладающие высокой симметрией, во многом отличаются от электромагнитного поля.

Например, на очень малых расстояниях соответствующие заряды могут обращаться в нуль, а на конечных расстояниях иметь вполне конечное значение. Это прямо противоположная ситуация по сравнению с электродинамикой! Получается, что заряд не ослабевает из-за экранировки виртуальными частицами, а, напротив, усиливается благодаря такой экранировке. А на малых расстояниях взаимодействие между частицами вообще исчезает.

Столь необычайный результат связан с такими свойствами калибровочных полей с высокой симметрией, которые не могут возникать в простейшем их случае у электромагнитного поля. Оказалось, что кванты сложных калибровочных полей способны непосредственно взаимодействовать друг с другом, тогда как фотоны не могут участвовать в таком взаимодействии — обычный свет «не светится», то есть не порождает новые фотоны.

Калибровочные же кванты способны «светиться» — они охотно порождают новые калибровочные кванты, и именно из-за такого дополнительного взаимодействия возникает необычная антиэкранировка точечного заряда.

Ясно, что такие замечательные свойства калибровочных полей немедленно привлекли внимание теоретиков, пытавшихся объяснить природу межкварковых сил. Кванты калибровочных полей — их и назвали *глюонами* — должны были сыграть роль удивительного клея, который позволяет кваркам чувствовать себя совершенно свободно внутри адрона, но не отпускает их далеко друг от друга. Теория взаимодействия всех цветных кварков и глюонов получила название *квантовая хромодинамика* (по-русски — цветодинамика). Она созвучна квантовой электродинамике, пожалуй, только по названию, поскольку свойства глюонов намного сложней, чем свойства фотонов.

Так сформулировалась современная картина строения адронов.

Не стоит, конечно, полагать, что она ясна целиком и полностью. Природа глюонов и, следовательно, сил, действующих между кварками, еще во многом непонятна, и потребуется еще огромная работа теоретиков и

экспериментаторов, чтобы детально выяснить все закономерности.

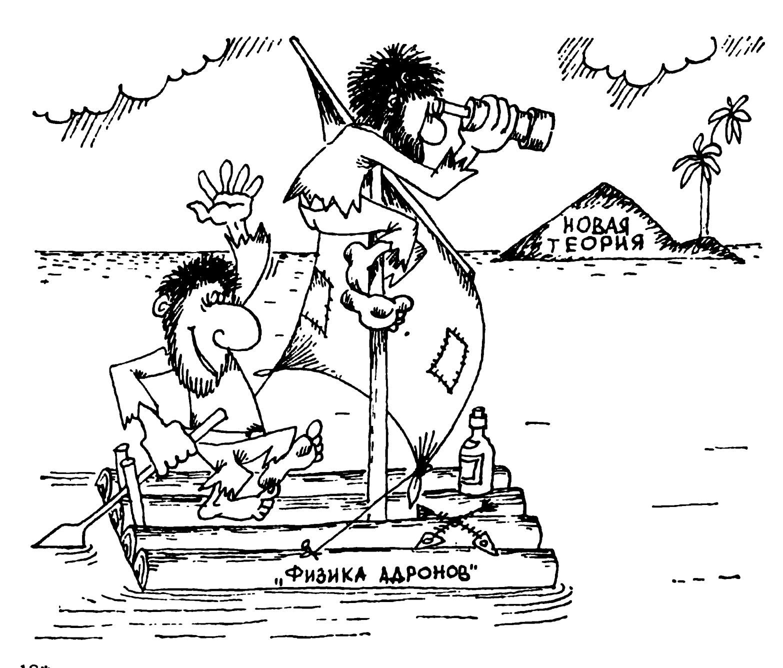
Хотелось бы верить, что в принципе принятая здесь схема строения адрона выглядит правильно. Но не исключено и другое, что между этой схемой и теорией адронов лежит область новой физики, подобно тому, как между моделью атома Резерфорда — Бора и современной теорией атома пролегла квантовая теория со всеми ее необычными представлениями...

Что же делать с эталонами, которые оказываются вовсе не эталонами? Как быть с аналогиями, которые подчас толкают нас по неверному пути?

Ответ может быть только один — надо работать, всегда искать новые возможности. Нравится нам это или нет, только новое не рождается из благих пожеланий и из простого созерцания. Оно создается нашими руками и по нашим проектам.

Важно представлять себе и то, что материалом для создания нового всегда является старое.

Можно тысячекратно объявлять эталоны реакционными пережитками, но это хорошо лишь постольку,



поскольку служит стимулом для создания новых эталонов. А создать новый эталон — дело очень сложное.

На начальном этапе всегда приходится заимствовать готовую аналогию и приспосабливать ее к новой области явлений. Скажем, модель электромагнитных взаимодействий приспосабливалась к описанию сильных процессов. В ней делались изменения, и она сама преобразовывалась. Оказалось, что в чем-то она применима, а в чем-то нет. И начинается мучительный процесс перестройки, привлечения других аналогий. Например, в физике адронов пришлось использовать несколько первоначально далеких друг от друга аналогий из других областей — вспомните хотя бы три картины строения адрона.

Одновременно физики учатся — да, да, именно учатся. Они создают новые математические методы анализа микромира, готовят новые экспериментальные средства.

И все эти факторы взаимодействуют между собой. Новые уравнения открывают новые возможности в объяснении наблюдаемых закономерностей. Новые эксперименты привлекают внимание к таким проблемам, на которые раньше не обращали внимания.

Постепенно совокупность старых аналогий, пересаженная на почву новых фактов, настолько преобразовывается, что наступает момент появления новой теории. В сущности, не момент, а какой-то промежуток времени, до которого наблюдалось как бы хаотичное движение противоречивых идей, а после него — упорядоченное представление еще об одной области знания...

Рискуя показаться отчаянным оптимистом, скажу, что в физике адронов мы уже вступили в такой промежуток. Но как близок твердый берег хорошей теории?

На этот вопрос ответить пока невозможно — все-таки мы плывем по незнакомому океану...

КАК РОЖДАЕТСЯ АДРОН?

У человека, приступающего к изучению теории любых взаимодействий, всегда создается впечатление, что упругое рассеяние частиц — простейший из простых процессов. Ведь в упругом рассеянии никакие внутренние свойства частиц не изменяются, в результате реакции получаются такие же частицы, какие были до нее.

В самом деле, гораздо проще исследовать, скажем, соударение двух обычных бильярдных шаров, которые все время остаются теми же бильярдными шарами. Лишь в момент соприкосновения они слегка деформируются, чтобы немедленно восстановить свою форму. Вообразим теперь такое положение, когда в результате удара один или оба шара способны рассыпаться на несколько таких же бильярдных шаров, причем этот развал происходит довольно часто, в большом числе случаев.

Физик сказал бы по поводу таких столкновений, что процесс размножения шаров происходит с большой вероятностью, и стал бы немедленно ставить точные опыты, чтобы выяснить, с какой именно вероятностью рождается один дополнительный шар, два дополнительных шара и т. д.

Предположим теперь, что физик узнал все необходимое и натолкнулся на такую любопытную ситуацию. Шары могут охотно рождаться, но все-таки некоторый небольшой процент событий — это чисто упругое рассеяние. И вот вероятность простейшего процесса — упругого рассеяния — оказывается каким-то образом связанной с тем, как ведут себя неупругие реакции, то есть те, в которых рождаются новые шары.

Продолжая свои опыты и осмысливая их теоретически, физик наконец находит закон действия сил между шарами. Иными словами, он определяет форму потенциальной энергии взаимодействия и теперь уже может теоретически рассчитать поведение шаров в результате упругого соударения. И при этом первоначальные подозрения о какой-то связи между упругими и неупругими реакциями превращаются во вполне конкретный факт. Оказывается, что потенциальная энергия взаимодействия между двумя шарами почти полностью определяется процессами «множественного рождения» шаров.

Создается довольно странная, с точки зрения привычной физики, ситуация — свойства самой простой реакции сильно зависят от свойств гораздо более сложных реакций, где могут участвовать многие объекты. Очевидно, все дело в необычности воображаемых шаров, столкновение которых мы обсуждаем. Эти шары охотно разваливаются при соударении и наверняка представляют собой сложные объекты. В момент, когда они

сталкиваются и снова разлетаются, то есть взаимодействуют только упруго, они все равно чувствуют сложную структуру друг друга. И в конце концов не столь уж и удивительно, что силы, которые проявляются в таком упругом соударении, сильно зависят от внутреннего устройства этих шаров, от того, каким образом они могут разваливаться на отдельные части...

Вся притча о шарах служит нам, конечно, лишь целям наглядности. Обычные бильярдные шары ведут себя обычным образом, так, как и положено механическим объектам. А описанные здесь воображаемые опыты просто воспроизводят свойства сильновзаимодействующих частиц — адронов.

Сильные взаимодействия, в сущности, потому и называют сильными, что участвующие в них частицы способны интенсивно рождаться. И чем выше энергия сталкивающихся адронов, тем больше в среднем рождается новых адронов. Например, при самых высоких энергиях столкновение протонов, достигнутых в ЦЕРНе (2000 ГэВ), рождается в среднем более десяти только заряженных частиц.

Адроны способны упруго рассеиваться друг на друге. Например, протоны примерно в 20 процентах всех событий при высоких энергиях испытывают именно упругое соударение. Но остальные 80 процентов относятся совсем к иному типу процессов — процессам «множественного рождения». Это и означает, что вероятность образования некоторого числа новых адронов очень велика, и поэтому физики часто говорят, что «множественное рождение» представляет собой главное явление, основной тип реакций с участием адронов.

В 1963 году советские теоретики А. Логунов и А. Тавхелидзе показали, что упругое рассеяние адронов можно описать уравнением, которое представляет собой прямое обобщение уравнения Шредингера на случай движения очень быстрых частиц. Оказалось, что потенциальная энергия взаимодействия адронов действительно определяется в основном множественными процессами.

Большая интенсивность «множественного рождения» служит практически сильнейшим доказательством сложного внутреннего строения адронов.

В свое время Ч. Янг предложил такую наглядную картину. Упругие реакции между адронами возможны

главным образом в том случае, когда сталкивающиеся адроны испытывают сравнительно слабый взаимный удар, то есть передают друг другу малый импульс и незначительно меняют направление движения, говорил он. События, в которых происходит передача большого импульса, крайне редки, и дело здесь в том, что адронам просто трудно передать друг другу большой импульс, сохранив свою целостность. Скорее всего они должны просто разваливаться на отдельные части — фрагменты, которые представляют собой не что иное, как обычные адроны. Адрон, не развалившийся при сильном ударе, — редкое явление!

Действительно, например, каждый из сталкивающихся протонов как бы насыщен мезонами, резонансами, парами барион — антибарион, которые охотно появятся в виде реальных частиц, если при соударении исходных протонов выделится достаточно большая энергия.

В 1969 году Ч. Янг со своими сотрудниками построили модель «множественного рождения» адронов, основанную на представлениях о фрагментации сталкивающихся адронов. В результате соударения, скажем, протона-снаряда и протона-мишени каждый из них как бы рассыпается на части — фрагменты, главным образом мезоны. Именно такой механизм образования частиц авторы считали главным. В сущности, он очень похож на способ множественного рождения шаров, который мы рассматривали в примере с необычными бильярдными шарами.

Через некоторое время Р. Фейнман внес важные изменения в эту картину. Фрагментация протона-снаряда и протона-мишени, конечно, существует, отметил он, но адроны, которые возникают как фрагменты сталкивающихся протонов, не являются определяющими. Главный механизм «множественного рождения» заключается в образовании большого числа сравнительно медленных частиц, в основном пи-мезонов, которые отнюдь нельзя считать фрагментами сталкивающихся протонов.

Явление, связанное с образованием таких сравнительно медленных частиц, получило название **пионизации**. Если попытаться пояснить его на основе простой картины сталкивающихся и размножающихся шаров, то придется привлекать весьма необычные представления.

Оказывается, что в результате соударения вообра-

жаемые бильярдные шары могут не только разваливаться на фрагменты, но и как бы сбрасывать с себя часть массы. Такие порции от каждого из шаров на небольшое время слипаются и образуют особый объект, который уже нельзя считать частью одного из шаров. Через некоторое время этот своеобразный объект распадается на новые шары.

Так что чем дальше, тем больше необычных свойств приходится приписывать этим бильярдным шарам. Это лишь подчеркивает, насколько далеки привычные механические объекты от того, что наблюдаются в микромире!

Существование фрагментации и пионизации было доказано экспериментально, однако наблюдаемая картина «множественного рождения» адронов оказалась значительно сложнее, чем предполагалось в фейнмановской модели.

Например, исследователи установили, что образующиеся адроны обладают сильной взаимосвязью, иными словами, акты рождения каждой частицы ни в коем случае не являются независимыми друг от друга. Вероятность появления каждого нового адрона зависит от числа уже образовавшихся адронов, причем чем больше их появилось, тем охотней рождаются новые.

Это свойство нельзя понять, не привлекая представлений о каких-то единых образованиях из очень большого числа адронов, которые могут появляться хотя бы на очень малое время в результате соударения.

Идеи о возможном появлении таких единых образований — своеобразных сгустков адронной материи — возникли довольно давно и были связаны с особой точкой зрения на природу «множественного рождения».

Впервые эта точка зрения была сформулирована Э. Ферми еще в 1950 году. В результате соударения протонов возникает чрезвычайно раскаленный сгусток вещества, считал он. Этот сгусток образуется очень быстро и очень быстро разогревается до огромных температур, поскольку вся энергия столкнувшихся протонов выделяется в микроскопически малом объеме пространства. Сразу же после образования сгусток начинает интенсивно распадаться на адроны, излучать их, подобно тому, как раскаленное тело излучает свет, то есть поток фотонов, и излучает до тех пор, пока не высветит всю свою энергию.

Советский физик И. Померанчук заметил в модели Э. Ферми один весьма странный момент: сгусток начинал распадаться на реальные адроны сразу же после соударения. При этом вещество сгустка было сжато до чрезвычайно высоких плотностей, и трудно было предположить, что в такой ситуации появится хоть один реальный адрон. Гораздо естественнее считать, что сгусток сначала должен расшириться и охладиться, а уже после этого он распадется на реальные адроны.

Модель И. Померанчука, которую впоследствии развил другой советский теоретик, Е. Фейнберг, не сразу нашла себе применение. Трудно было согласовать ее с данными наблюдений в предположении, что весь процесс в целом выглядит так, как предписывает эта модель. Однако образуются ли раскаленные сгустки адронного вещества, к описанию распада которых ее и следовало применять?

В 1958 году группа краковских физиков под руководством М. Менсовича исследовала события, вызванные частицами космических лучей в стопках фотоэмульсионных пластинок, побывавших в стратосфере. При энергии налетающей частицы порядка 1 ТэВ (тысяча миллиардов электрон-вольт) были обнаружены любопытные процессы образования двух группировок вторичных мезонов, вылетающих в противоположных друг другу направлениях. После всех необходимых расчетов получалась такая картина, словно эти мезоны происходят от распада каких-то сгустков адронной материи, причем характеристики распада были очень похожи на те, которые встречались в уже упомянутой модели равновесного излучения фотонов раскаленными телами. Отсюда и появилась идея, что в экспериментах обнаружены сверхгорячие объекты с температурой порядка триллиона (10^{12}) градусов, которые распадаются за очень малое время на 10—12 мезонов.

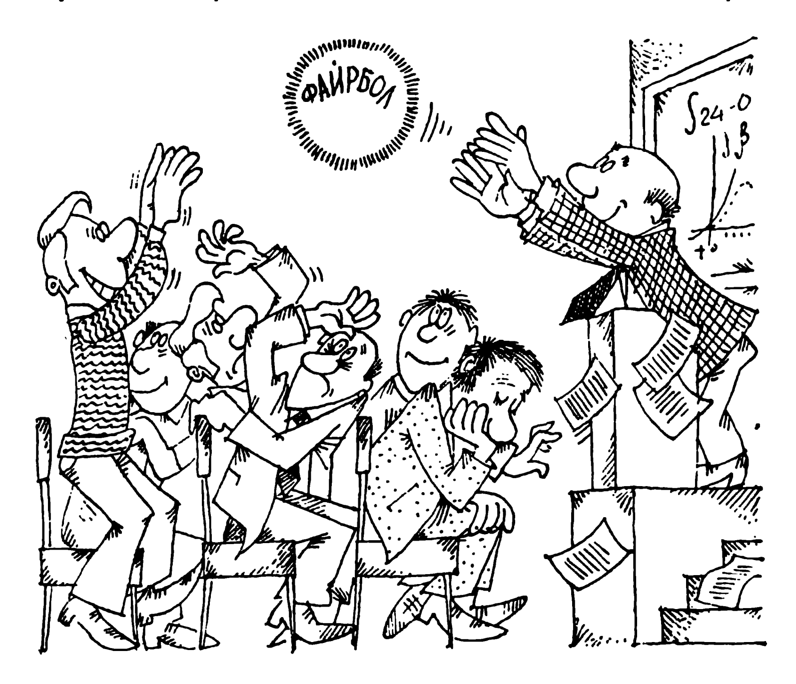
У М. Менсовича и его сотрудников этот объект, по-видимому, ассоциировался с образом известной шаровой молнии — компактным, но крайне неустойчивым комком высокотемпературной плазмы, который иногда образуется во время грозы и наводит ужас на очевидцев своими причудливыми передвижениями. Этот сгусток так и был назван ф а й р б о л (огненный шар).

Впоследствии такого типа события регистрировались «космиками» неоднократно, и наиболее выдающиеся

файрболы даже получали свои имена. Не так давно, в 1971 году, был сфотографирован гигантский ливень, названный «Андромеда» — основное почернение фотопластинки напоминало контурами изображение туманности Андромеды и имело средний диаметр свыше 3 сантиметров. Согласно расчетам ливень был вызван попаданием в атмосферу частицы с энергией не менее 10^{16} электрон-вольт.

Однако подобные единичные явления не позволяли с уверенностью говорить о существовании нового класса адронных объектов. Во-первых, всегда оставалась надежда, что при более тщательном анализе большого набора данных на ускорителях «файрбольный эффект» объяснится уже известными частицами и взаимодействиями между ними. Во-вторых, приняв гипотезу о файрболах, физики сталкивались с из ряда вон выходящими свойствами, которые даже при богатом воображении трудно было приписать какому бы то ни было частицеподобному образованию.

Такая точка зрения усилилась еще и в связи с наступлением «резонансного потопа». Резонансы, пред-



ставляющие собой короткоживущие ассоциации сцепившихся вместе двух или трех адронов, позволили объяснить некоторые тонкие детали «множественного рождения», в частности, появление довольно сильных взаимосвязей между некоторыми парами и тройками образующихся мезонов. Однако, как вы помните, они были достаточно похожи на обычные адроны: обладали определенными, не зависящими от способа рождения массами и другими параметрами. У файрболов, которые должны были формироваться из гораздо большего числа мезонов (до 10), подобной устойчивости параметров не наблюдалось — получалось так, что их массы более или менее равномерно разбросаны по огромному интервалу от 1,5 до 3,5 — 4 ГэВ. Величина же массы существенно зависит от того, каким способом образовался файрбол.

На сегодняшний день ситуация с существованием файрболов по-прежнему не ясна. Однако есть очень веские доводы в пользу того, что именно они или объекты с очень близкими свойствами обеспечивают сильную взаимосвязь актов рождения адронов.

В общем «множественное рождение» адронов представляет собой очень сложный тип процессов. Он сложен и для экспериментального исследования, и для теоретической интерпретации.

Очень интересно обсудить этот процесс в связи с теми представлениями о структуре адронов, которые мы рассматривали в предыдущих разделах. В самом деле, наличие у реальных адронов весьма сложной структуры — одна из наиболее трудных проблем как раз для теории их образования.

Интуитивно ясно, что рождение составного объекта с развитой пространственной структурой не происходит мгновенно, как какой-то элементарный акт. Требуется определенное время, чтобы такой объект сформировался, испытал необходимую эволюцию.

Элементарный мгновенный акт рождения или гибели частицы — представление, заимствованное из атомной физики, где излучение атома рассматривается как мгновенное испускание фотона электроном. Возможно, что такая картина хороша лишь постольку, поскольку мы считаем фотон элементарной частицей.

Адрон — частица явно не элементарная, и его обра-

зование следует считать опять-таки неэлементарным актом с определенной длительностью во времени.

На первом этапе обязательно должен образоваться особый «кварковый атом», скажем, пара из кварка и антикварка — своеобразный зародыш мезона, отражающий его зарядовые характеристики. Появление «кваркового атома» может проходить очень быстро, практически мгновенно, поскольку кварки представляют собой истинно элементарные бесструктурные частицы.

Однако последующие этапы превращения зародыша в реальный адрон должны иметь некоторую длительность. «Кварковый атом» постепенно приобретает свое «кварковое море», внешнюю оболочку из виртуальных адронов, то есть «одевается» и принимает те размеры и формы, которые свойственны реальному адрону. Только после этого новая частица становится реальным адроном и покидает область взаимодействия. Вся операция по формированию адрона занимает не менее 10^{-23}—10^{-24} секунды — за это время адрон и достигает нормальных размеров порядка 10^{-13} сантиметра.

Таким образом, простая схема внутреннего устройства адрона, которую мы обсуждали ранее, одновременно отражает те стадии развития, которые должен пройти адрон в процессе рождения, является как бы экономичной формой записи программы эволюции адрона — от элементарного «кваркового атома» до реальной структурной частицы.

Все это может показаться слишком «страшным». Казалось бы, нарисована довольно ясная картина строения адрона — валентные кварки плюс две оболочки, — к чему же теперь все усложнять, называть эту структуру «записью программы эволюции»?

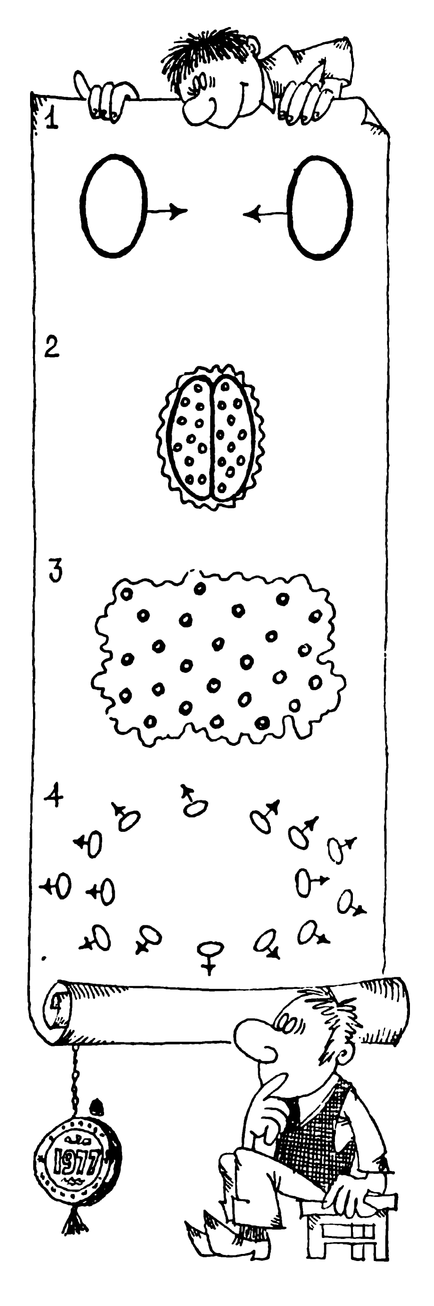
Что поделаешь! Усложнение здесь необходимо, и, конечно, не ради самого усложнения.

Дело в том, что картина строения адрона имеет объективный смысл тогда и только тогда, когда она верна в любой ситуации. Иначе мы вынуждены были бы рисовать множество картинок с подписями типа: «Таким видится адрон такой-то частице при таких-то условиях, а таким при таких-то».

Как вы уже успели убедиться, описание структуры частицы обязательно связано с ее поведением в определенных реакциях. Физик не может говорить о внутреннем устройстве микрообъекта, не подвергая этот

микрообъект разнообразным и довольно сильным воздействиям со стороны других микрообъектов. Непосредственно в эксперименте мы наблюдаем поведение частиц только в различных реакциях с другими частицами.

На основе замеченных, подчас весьма необычных закономерностей этого поведения мы должны проделать особую реконструкцию, создать единый образ частицы, который согласуется со всеми данными наблюдений. При этом мы лишены приятной воз-



Возможная картина поэтапного формирования адронов в области взаимодействия в процессах аннигиляционного типа (разделение на стадии сугубо условное).

На самой ранней стадии образуется партонная «каша» — неравновесное вещество, состоящее из «голых» адронов. Расширение этого сгустка сопровождается формированием пространственных неоднородностей — относительно небольших сгустков виртуальных частиц — своеобразных зародышей реальных адронов. На последней стадии формирование завершается, «зародыши» успевают разойтись на довольно большие расстояния и, разделив между собой «шубу», перестают взаимодействовать. Далее регистрируются свободные адроны, причем с большими взаимными корреляциями — памятью о происхождении из общего партонного сгустка.

можности отбросить все абстракции и сложные построения в сторону и просто взять и посмотреть, как же выглядят эти частицы «на самом деле». Потому что на самом деле они выглядят именно так, как... ведут себя в различных реакциях.

В этом смысле физик, изучающий микромир, находится примерно в том же положении, что и палеозоолог, пытающийся по тысячам косвенных данных восстановить внешний вид и повадки какого-нибудь ископаемого ящера. Но специалисту по древнейшей фауне легче хотя бы потому, что он имеет возможность наблюдать собственными глазами других животных, пока не перешедших в разряд ископаемых...

Картина строения адрона из валентных кварков и двух оболочек основана главным образом на исследовании рассеяния электронов. Именно таким и «видится» адрон электрону. Примерно такими же представляются друг другу и адроны в процессах взаимного рассеяния. Теперь же перед нами встала новая задача: выяснить, хороша ли схема с точки зрения процессов рождения адронов? Иными словами, необходимо приспособить эту схему строения к описанию особого типа реакций их образования. Раньше мы имели дело как бы с готовым адроном, а теперь должны понять, как этот адрон приготавливается. Ведь готовые реальные адроны не «сидят» внутри других адронов, они рождаются только в результате соударений.

Именно поэтому и необходимы все разговоры об эволюции, обсуждение законов формирования структурного адрона.

То, что адроны постепенно формируются, как бы наращивая свою структуру, позволяет нам понять общую причину сильной взаимосвязи между актами их испускания. Ведь новые адроны формируют свою структуру за счет единого строительного материала — кварков-партонов, — который в изобилии существует в течение всего времени взаимодействия между столкнувшимися частицами.

А теперь попробуем нарисовать упрощенную картину «множественного рождения».

Предположим, что сталкиваются между собой два протона. Их внешние оболочки, состоящие из виртуальных адронов, возбуждаются, почти готовые виртуальные адроны получают необходимую энергию, достраивают

свою структуру и сбрасываются с каждого протона. Этот процесс и соответствует фрагментации.

Родившиеся таким образом адроны представляют собой как бы фрагменты — осколки одного из столкнувшихся протонов. Но, как вы помните, фрагментация — лишь один, и при том не основной, механизм «множественности рождения». Основное число новых частиц появляется не в качестве фрагментов какого-либо протона, а производится, так сказать, коллективно обеими сталкивающимися частицами. Что же происходит в этом случае?

Оказывается, здесь для объяснения такого механизма рождения приходится привлекать свойства кварков-партонов, в основном их способность сильно взаимодействовать на сравнительно больших расстояниях.

В промежуток времени, когда столкнувшиеся протоны взаимодействуют между собой, их внешние оболочки испытывают сильное возбуждение и частично разрушаются. Это может сопровождаться следующим интересным явлением. Начинают активно взаимодействовать между собой кварки-партоны из кварковых морей — промежуточных оболочек каждого протона.

«Морской кварк», находящийся в одном из протонов, воспринимает аналогичный кварк из другого протона как «беглеца», так же как он воспринял бы своего соседа по кварковому морю, попытавшегося уйти на большое расстояние и покинуть собственный протон. Таким образом, кварки из «морей» немедленно начинают взаимную атаку, пытаясь затащить друг друга в свою структуру. Роль арканов, которые кварки из различных протонов набрасывают друг на друга, играют силы, переносимые глюонами.

Результаты этих микросражений могут быть самыми разнообразными. Каждый из протонов приобретет и потеряет то или иное количество кварков, но в среднем итог окажется ничейным, наподобие известной ситуации с двумя равносильными командами, перетягивающими канат. Однако взаимодействие кварковых морей не пройдет бесследно.

Каждый из протонов как бы выплеснет из себя определенное количество кварков-партонов, которые не смогут ни возвратиться назад, ни попасть в другой протон. Порции кварков-партонов из каждого протона объединятся в единый сгусток своеобразного партонно-

го вещества, который уже не принадлежит ни одному из столкнувшихся протонов, а представляет собой какой-то особый объект. Этот объект в высшей степени нестабилен. Но для того чтобы он распался к концу взаимодействия, в нем должны успеть сформироваться реальные адроны. Ведь отдельные кварки-партоны его покинуть не могут, они будут немедленно затянуты назад этим сгустком или одним из протонов.

Исходного строительного материала для формирования реальных адронов в этом сгустке вполне достаточно. Первоначально — по условиям своего образования — сгусток состоит в основном из отдельных кварков и антикварков, покинувших один из протонов.

Кварки и антикварки попарно образуют «кварковые атомы» — зародыши будущих реальных мезонов. Несколько менее вероятно образование зародышей из трех кварков или трех антикварков, которые впоследствии становятся барионами или антибарионами соответственно. Эти зародыши начинают постепенно обрастать структурой, каждый из них формирует вокруг себя из свободных кварков-партонов кварковое море, а потом и внешнюю оболочку. По прошествии определенного времени в сгустке вообще не остается свободных кварков-партонов, все они как бы разбираются по формирующимся вокруг зародышей оболочками. Сгусток превращается в набор отдельных адронов, которые уже полностью сформировались, и распадается на эти адроны, главным образом пи-мезоны.

Теперь понятно, почему этот механизм «множественного рождения» — пионизацию — нельзя рассматривать как развал самих сталкивающихся протонов. Ведь новые частицы образуются в этом случае из особого сгустка, порожденного, в свою очередь, из структурных элементов обоих протонов. Очень вероятно, что зародыши реальных мезонов, которые образуются в таком процессе, представляют собой «кварковые атомы», включающие в себя, скажем, кварки из одного протона и антикварк — из другого. Так что эти мезоны оказываются продуктом «коллективного творчества» обоих сталкивающихся протонов!

Новые мезоны, рождающиеся из сгустка, должны в определенной степени помнить о своем происхождении из единого сгустка кварк-партонного вещества. Видимо, этим и можно объяснить сильную взаимосвязь между

ними, заметную взаимозависимость актов рождения различных мезонов. Не исключено, что в результате столкновения протонов образуется не один, а несколько сгустков, которые потом и распадаются, излучая адроны.

Что же это за сгустки? Не являются ли они теми самыми файрболами, о которых сообщали исследователи космических лучей?

Может быть, так и есть; но до полной уверенности еще далеко. Вообще нарисованная здесь картина «множественного рождения» имеет весьма предварительный характер. Многие, причем отнюдь не второстепенные детали пока еще не ясны. Скорее всего это своеобразный проект, набросок той картины, которая появится в будущей теории сильных взаимодействий.

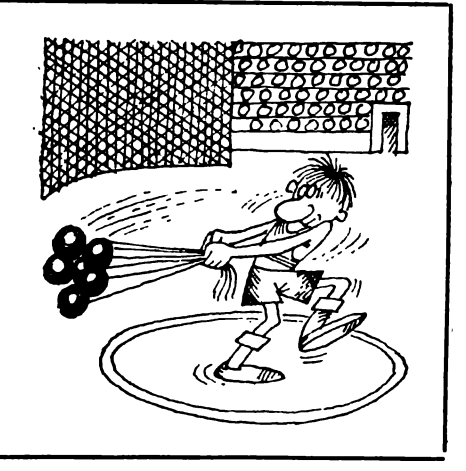
Пока же вопросов все еще больше, чем ответов. Вы, конечно же, заметили, что все заголовки данной главы — тоже вопросы. Их на самом деле много — этих проблем, трудностей и неясностей, относящихся к поведению адронов. А лептоны, а фотон?

И здесь нерешенных задач больше, чем хотелось бы видеть, отмечая 80-летие самой красивой дамы физического королевства...

Впрочем, стоит вспомнить прекрасную бальзаковскую строку: «Ключом ко всякой науке является вопросительный знак». Она, несомненно, должна утешать исследователей микромира, у которых накопилась внушительная связка этих самых «ключей». Остается совсем немного — выяснить, какой из них послужит настоящим «золотым ключиком» к будущей теории элементарных частиц.

ГЛАВА ШЕСТАЯ,

ПОЛНОСТЬЮ НАПРАВЛЕННАЯ В БУДУЩЕЕ



Что самое общее для всех? — Надежда; ибо если у кого и ничего нет, то она есть.

Фалес Милетский

НАДЕЖДЫ, ДЕНЬГИ И ВСЕ ТАКОЕ...

Я долго соображал, как назвать этот раздел. По инерции, унаследованной от предыдущей главы, проносились вопросительные заголовки типа: «К чему мы стремимся?», или: «Сколько стоит Бег за Бесконечностью?» В конечном счете эти вопросы и определяют цель очередного рассказа.

Физики все время стремятся к предельному упрощению картины сильных взаимодействий. Существует предположение, что эта картина должна действительно упрощаться с ростом энергии сталкивающихся частиц. На первый взгляд оно кажется чуть ли не парадоксальным. Например, с ростом энергии рождается все больше и больше адронов, а разбираться с несколькими частицами, образовавшимися в результате соударения, уже довольно сложно.

Но в том-то и дело, что речь должна идти не о «несколько» и даже не о «много», а об «очень много». И именно в последнем случае мы может рассчитывать на определенную простоту.

Во-первых, при достаточно высоких энергиях физики могут столкнуться с каким-то новым субэлементарным

уровнем строения вещества и объяснить, таким образом, устройство известных элементарных частиц. Это, конечно, идеальный вариант, несколько напоминающий историю атомной физики. Ведь в свое время атомы были поняты благодаря тому, что из них удалось выделить составные части — электроны и ядра. Несмотря на то, что и электроны и ядра до сих пор остаются в роли изучаемых и недостаточно понятных объектов, структура атомов считается известной и весьма простой. Казалось бы, идеи о кварковой и партонной структуре адронов хорошо оправдываются, и, следовательно, открытие субэлементарного уровня вот-вот произойдет.

Но что делать, если реальные кварки так и не появятся? Как вы помните, это не столь уж и удивительная возможность — кварки могут быть навечно заперты внутри адронов огромными силами притяжения. Оказывается, что и в этом случае необходимо стремиться к изучению взаимодействия частиц при все более высоких энергиях.

Дело в том, что, хотя кварки и заперты внутри адрона и никаким сколь угодно сильным ударом их нельзя оттуда извлечь в чистом виде, с ростом энергии их присутствие в адроне будет проявляться все отчетливей. Пусть экспериментаторы так никогда и не увидят следы составных частей адрона на фотопленке: важно то, что чем больше энергия налетающей на адрон частицы, тем лучше она, эта частица, будет чувствовать отдельные элементы структуры — кварки. В конце концов тогда картина адронных процессов станет достаточно простой, и мы сумеем выяснить природу межкварковых сил.

Нелегко представить себе составной объект, из которого никоим способом нельзя выделить его составные части. Их можно почувствовать, только взаимодействуя со всем объектом как с целым... Это трудное новое представление, с которым постепенно придется осваиваться, подобно тому, как лет 50 назад с трудом осваивалась квантовомеханическая картина атома.

Стремление работать со все более высокими энергиями основано, конечно, не только на желании разобраться в поведении и структуре адронов. Одна из самых важных задач, стоящих перед физиками, — детальный анализ слабых взаимодействий элементарных частиц. Единственная частица, которая непосредственно уча-

ствует только в слабых взаимодействиях, — это нейтрино. Поэтому все больший интерес вызывают эксперименты по рассеянию нейтрино высоких энергий на протонах, лептонах и атомных ядрах.

Современная модель слабых взаимодействий предсказывает, например, очень быстрый рост сечения рассеяния нейтрино на протонах. Самое любопытное состоит в том, что пока экспериментальные данные очень хорошо подтверждают это предсказание. С другой стороны, общие принципы современной теории позволяют заключить, что эта модель при достаточно высоких энергиях непременно должна нарушиться.

Столь же интересные проблемы существуют и в физике электромагнитных взаимодействий. Важно узнать, вплоть до каких энергий будет применима квантовая электродинамика? Как будут вести себя сверхэнергичные фотоны, сталкиваясь с электронами и адронами? И это все — лишь небольшая часть многих и многих совершенно конкретных задач, требующих постановки экспериментов при все более высоких энергиях.

Вообще-то физики всегда надеются на открытие чего-нибудь совершенно неожиданного, и надежды часто оправдываются. Но это, как правило, лишь неизбежные подарки природы за настойчивость исследователей. Бывает, что обнаруживаются и фантастические частицы, и удивительные закономерности, однако, как мы уже не раз успели убедиться, под «принеси то, не знаю что» опытов никто не ставит и ускорителей никто не строит.

Стэнфордский электронный ускоритель создавался с вполне определенной целью — надо было более глубоко изучить структуру адронов и, конечно, проверить, пригодна ли современная квантовая электродинамика для описания явлений в области достаточно высоких энергий. Открытие партонов послужило прекрасным оправданием этого проекта — ведь были обнаружены новые элементы структуры нуклона!

Кроме того, в Стэнфорде была построена специальная установка СПИР — накопительное кольцо для того, чтобы иметь возможность сталкивать между собой пучки электронов и позитронов. Этот проект преследовал сравнительно скромную цель — измерить сечения различных процессов, возникающих при электрон-позитронных столкновениях. Но за внешне скромной идеей стоя-

ли великие надежды. Ведь квантовая электродинамика дает четкие предсказания по поводу взаимодействия этих частиц, однако при высоких энергиях эта теория становится недостаточной, поскольку электрон и позитрон охотно аннигилируют в адроны, и тут уж без знания законов сильных взамодействий не обойтись. Надо было разобраться, что же идет от чисто электромагнитных взаимодействий, а что — от адронных процессов. Физики и раньше предчувствовали, что вклад последних не так уж мал, но то, что они увидели, превзошло все ожидания.

В конце осени 1974 года научный мир был потрясен серией удивительных сообщений. Американский журнал «Письма в физическое обозрение» поместил сразу три небольшие заметки на одну и ту же тему. Во всех трех говорилось, что в электрон-позитронных столкновениях обнаружен новый тип резонансных частиц. Заметки поступили практически одновременно из Брукхэвена, из Стэнфорда и из итальянского города Фраскати, причем итальянцы, чтобы не терять время на почтовую пересылку, продиктовали свою статью прямо по телефону...

Новые частицы пси-мезоны, как их сразу обозначили, обладали весьма примечательными свойствами: массами более 3 ГэВ и слишком большим временем жизни, чтобы считать их обычными адронными резонансами. Некоторое время сохранялась надежда, что сделано «открытие века» — найдены наконец долгожданные зэт-мезоны — гипотетические переносчики слабых взаимодействий наряду с дубль-вэ-мезонами (заместители фотонов по «слабым силам»).

По поводу дубль-вэ-мезонов и дубль-зэт-мезонов физики думали, что они будут иметь большие массы и взаимодействовать только слабым и электромагнитным образом. Но вскоре было доказано, что пси-мезоны — настоящие адроны, а их долгожительство оказалось действительно сложнейшей проблемой. В процессе ее исследования выяснилось, что теперь уже без нового квантового числа — «очарования» обойтись практически невозможно. Пси-мезоны должны быть своеобразными кварковыми атомами, состоящими как раз из «очарованного» кварка и антикварка.

История открытия пси-мезонов интересна и сама по себе, но для нас она играет дополнительную роль как пример незапланированного открытия в сугубо плано-

вых экспериментах. В Брукхэвене опыты ставились на старом протонном ускорителе, работающем уже с 1960 года, и изучались электрон-позитронные пары, образующиеся в результате бомбардировки ядер бериллия протонами. В Стэнфорде же и во Фраскати исследования велись на установках, специально созданных для получения высокоэнергетических электронных и позитронных пучков. Но, конечно, ни в одном из этих центров не предполагали, что удастся открыть именно пси-частицы, а просто выполняли весьма обширные программы по измерению сечений электрон-позитронных взаимодействий. Можно ли сказать, что исследователям просто повезло? Только лишь отчасти! Ибо не имей они ясных целей, до везения дело бы просто не дошло.

Без хорошо обоснованных экспериментальных программ современная физика высоких энергий совершенно немыслима. И дело здесь не только в скептическом или восторженном отношении к броскам «в нечто неведомое». За эмоциями стоят весьма серьезные, хотя и несколько прозаические аргументы — рубли, доллары, фунты, марки...

Вот Серпуховский ускоритель. Его протонный пучок разгоняется до 76 ГэВ и несет примерно два с половиной триллиона частиц в каждом импульсе. В полуторакилометровом подземном туннеле установлены 120 магнитных блоков общим весом 20 тысяч тонн...

Батавия. «Колечко» радиусом один километр, по которому разбросано 954 магнита весом от 5 до 11 тонн каждый. Достигнута энергия 405 ГэВ...

Американцы, умеющие мгновенно находить долларовый эквивалент чего угодно, как-то подсчитали, что один гигаэлектрон-вольт нового ускорителя обходится в среднем ни много ни мало ровно в миллион долларов! Так что каждый очередной шаг в глубь микромира требует и серьезных экономических размышлений.

Нужно иметь высокоразвитую техническую и экономическую базу, чтобы создавать мощные ускорительные установки. Пока этими возможностями располагают две страны: СССР и США. Уже сейчас ни одна страна мира, за исключением Советского Союза и Соединенных Штатов, не способна собственными силами построить ускоритель с энергией пучка 100—1000 ГэВ и обеспечить необходимое финансирование дальнейшей его ра-

боты. Двенадцати крупнейшим государствам Западной Европы, среди которых Франция, ФРГ, Англия, Италия, пришлось объединить усилия, чтобы создать ЦЕРН, где работает ускоритель на 30 ГэВ. Несколько лет назад там было создано накопительное кольцо, позволяющее исследовать взаимодействия протонов при энергиях до 2000 ГэВ. Уже подготовлен к пуску новейший суперсинхротрон с энергией протонного пучка до 400 ГэВ, а на очереди — новое накопительное кольцо, которое позволит столкнуть два пучка по 400 ГэВ друг с другом, то есть наблюдать процессы, происходящие при 320 тысячах ГэВ (320 триллионов электрон-вольт!).

Прекрасным примером «эволюционизирующего ускорителя» служит Батавийский синхротрон. Первоначальный проект предполагал вывод пучка до 200 ГэВ. Сейчас уже достигнут рубеж 400. Не за горами и покорение следующего рубежа — 500. После этого предусмотрена серьезная перестройка ускорителя — будет введено в строй кольцо со сверхпроводящими магнитами, которое обеспечит гораздо большее магнитное поле. Это



позволит при том же радиусе кольцевого туннеля получить частицы с энергией до 1000 ГэВ. Предусмотрено также строительство накопительного кольца, что позволит в не слишком далеком будущем приступить к исследованию адронных процессов при энергиях до 2 миллионов ГэВ.

Развитие физики элементарных частиц и атомного ядра рассматривается как ведущее направление в советских научно-исследовательских программах.

Большая программа реконструкции намечена сейчас и в Серпухове. Рабочие площадки Института физики высоких энергий станут настоящим «комбинатом» по раскрытию тайн микромира. Главные усилия будут приложены к сооружению нового ускорителя примерно на 1200 ГэВ. Длина кольцевого туннеля достигнет 20 километров! Рядом с этим гигантом расположатся накопительные кольца и другие ускорительные установки, где будут разгоняться до фантастических скоростей не только протоны, но и электроны. Предусмотрены специальные установки для получения интенсивных пучков античастиц, прежде всего антипротонов и позитронов. Таким образом, физики получат уникальные возможности решения множества задач. Исследования будут вестись гораздо более широким фронтом, чем в любом ныне действующем центре, — ведь у экспериментаторов появятся пучки самых различных частиц при различных энергиях, причем в невиданно широком диапазоне. В проекте заложены и превосходные возможности развития. Для всех крупнейших ускорителей Серпуховского комплекса предусмотрен последующий переход к сверхсильным магнитам, которые позволят значительно увеличить энергии частиц.

Интересную идею проводят в жизнь ученые Объединенного института ядерных исследований в Дубне. По инициативе директора Лаборатории высоких энергий, члена-корреспондента АН СССР А. Балдина старый Дубненский синхрофазотрон «переведен на новую работу» — теперь он ускоряет не отдельные частицы, а целые атомные ядра.

Все эти достижения превосходны. Однако дальнейшее движение вперед потребует новых особых усилий. К сожалению, накопительные кольца — не панацея от всех бед. На встречных пучках нельзя поставить многие необходимые эксперименты, да и точность доступных

измерений в этом случае значительно ниже, чем на обычной установке с пучком, падающим на неподвижную мишень из конденсированного вещества. Поэтому физики не «почили на лаврах». Они упорно ищут новые идеи получения чрезвычайно высоких энергий при сравнительно небольших размерах и весе установки. Уже много лет в Дубне разрабатывается оригинальный метод коллективного ускорения. Высокая эффективность достигается здесь за счет того, что разгоняется, скажем, не чистый пучок протонов, а целый коллектив частиц — своеобразный комок плазмы с большим суммарным зарядом. В случае успеха этот метод откроет исключительные перспективы.

Но не следует, конечно, забывать, что сама разработка новых принципов ускорения тоже требует значительных средств. Это показала и история внедрения сверхпроводящих магнитных систем, и исследования по коллективным методам. Реальные затраты на осуществление крупных высокоэнергетических программ достигают астрономических цифр. Бюджет ЦЕРНа на 1976 год составлял около 663 миллионов швейцарских франков. Европейский центр занимает территорию свыше 550 гектаров по обе стороны франко-швейцарской границы. Под площадку Национальной ускорительной лаборатории в Батавии было отведено 2750 гектаров, и американцы за одну только электроэнергию платят несколько миллионов долларов в год!

Все эти затраты на штурм микромира наводят на разнообразные размышления. Почему общество столь щедро на организацию исследований в области физики высоких энергий? Такой вопрос нередко возникает и у ученых, и у людей, далеких от науки. Подробное обсуждение данной проблемы не входит в наши цели. Отметим только один общий момент. Щедрость — дело тоже относительное. Разумеется, сумма, которую конгресс США выделил на строительство ускорителя в Батавии, — 250 миллионов долларов — производит неотразимое впечатление. Но ведь, скажем, одна подводная суперлодка «Огайо» с ядерными «трайдентами» на борту стоит «всего-навсего» один миллиард долларов...

Проблема конкуренции физики высоких энергий с другими разделами физики и с целыми областями науки — тема очень глубокая и интересная. Государственный бюджет не резиновый, и каждый лишний миллион

на ускорители заставляет притормаживать другие важные и дорогостоящие исследования. По этому поводу высказывались многие крупнейшие ученые, и появились даже некие крайние позиции: развивать физику высоких энергий, что называется, по потребности и предельно мощными темпами или, наоборот, притормозить ее развитие ради более активного финансирования других жизненно важных работ, например, термоядерной энергетики, медико-биологических исследований, повсеместного внедрения лазерной технологии и тому подобное.

Сейчас трудно сказать, кто первым начал отстаивать такие крайние позиции, но обе они не кажутся приемлемыми.

Развитие физики высоких энергий в ущерб другим областям таит серьезную опасность, и едва ли не в первую очередь для нее же самой. Дело в том, что успешная работа современных ускорителей обеспечивается огромной совокупностью самых современных достижений в десятках разделов науки и техники. Гигантские камеры для регистрации событий — подлинное чудо физико-химической и инженерной мысли. А куда деваться сейчас без электроники, без «думающих» машин? Подобно тому, как растение увядает без питательной, непрерывно обновляемой среды, физика высоких энергий не способна развиваться в области экспериментальных средств без интенсивного развития всей науки.

Противоположная крайность приводит к не меньшему застою. Процессы с элементарными частицами при высоких энергиях крайне далеки от человеческой практики, считают сторонники такой точки зрения. Другое дело атомно-молекулярный и даже ядерный уровень. Прорыв к ним обеспечил фантастический прогресс в понимании структуры обычного вещества, позволил добыть новые виды энергии. Теперь же, когда исследования ушли в область редко осуществляющихся условий, а вещество, разогретое до тысяч триллионов градусов (соответствует энергиям батавского пучка), представляет собой редкое явление — нет смысла слишком спешить, поскольку «не типичное — не используешь». Не лучше ли обратить, если не все, то хотя бы значительную часть средств, которые затрачиваются на ускорители, на другие важные и благородные задачи, прежде всего на ускоренную разработку термоядерных станций и борьбу с самыми опасными заболеваниями?

По поводу опасности пессимистических прогнозов физики любят приводить такой факт: сам Э. Резерфорд, умерший за год до расщепления атомного ядра и за пять лет до пуска первого ядерного реактора, до конца своих дней был уверен, что ядерная физика не несет никаких серьезных прикладных возможностей.

Это вполне справедливое напоминание. Не исключено, что и физика элементарных частиц откроет перед человечеством фантастические источники энергии, причем не в столь уж и отдаленные сроки. Но это может остаться и приятной мечтой. А вот в другом направлении уже есть великолепные достижения. В деле концентрации энергии современные ускорители не знают себе равных, и именно здесь четко вырисовываются контуры новой революции в прикладной науке и в технологии.

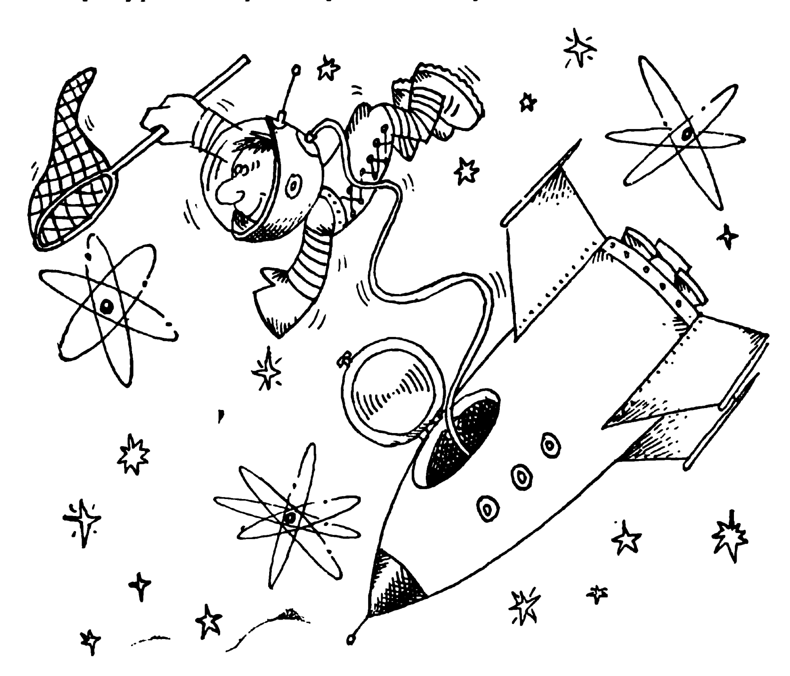
В пучке высокоэнергетических частиц ускоритель способен создать такую концентрацию энергии, которую в принципе нельзя получить никаким иным методом. Уже сейчас протонные пучки успешно выжигают внутренние раковые опухоли без малейшего повреждения не только кожного покрова, но и окружающих опухоль здоровых тканей. Точная фокусировка при больших мощностях осуществляется благодаря замечательным свойствам сильных взаимодействий. Мощные электронные ускорители позволяют «зажигать» плазменные реакторы. Ускорители становятся привычным элементом не только онкологических центров и термоядерных установок — они приходят и в промышленность. Разработка дубненскими физиками метода изготовления сверхтонких фильтров для пищевой и химической промышленности и с помощью интенсивных ионных пучков позволила добиться резкого повышения качества ряда продуктов и принесла государству многомиллионную экономию. В общем, дискуссии идут, а частицы высоких энергий работают...

Кто-то подсчитал, что все затраты на фундаментальную науку от «царя Гороха» до наших дней с лихвой окупаются всего лишь недельным выпуском промышленной продукции во всем мире. Жаль, что очень трудно (я думаю, вообще невозможно!) учесть, какой процент мировой продукции целиком обязан достижениям фундаментальной науки...

И наконец, обратимся к внутренним разногласиям в

физике высоких энергий. В сущности, это не столько разногласия, сколько деловая дискуссия о путях развития. Резкий взлет ускорительной цехники, бесспорно, послужил сигналом к некоторому скепсису в отношении космических лучей. Сравнительно низкая точность результатов и сама форма работы «сидеть у моря (чаще в горах!) и ждать погоды» стали слишком сильным испытанием терпения физиков. Но прошло время, и стало ясно, что «космики» действительно предсказывали едва ли не все важнейшие результаты на основе своих скудных данных.

Например, в настоящее время они указывают на проявление каких-то новых эффектов в районе 10^{14}—10^{15} электрон-вольт, и это служит дополнительным стимулом к быстрейшему созданию накопительных колец для предварительной проверки их данных. Исследования космических лучей вступили сейчас в своеобразную фазу индустриализации — на высокогорье разворачиваются огромные площадки счетчиков (на советской станции «Памир» — 1000 квадратных метров!), аппаратура для регистрации энергичных космических



частиц устанавливается на спутниках, запускаются целые научные станции... Недалек тот день, когда «космики» осуществят заветную мечту — установят стационарные наборы счетчиков на поверхности Луны.

В целом проблема внутренней и внешней конкуренции физики высоких энергий сама является предметом научных изысканий. Поэтому легко разобраться только с крайними, а потому всегда уязвимыми точками зрения. Большинство же предложений вблизи «золотой середины» требует тщательного изучения специалистами по планированию.

Сложная развивающаяся наука в сложном развивающемся мире...

САМАЯ БОЛЬШАЯ МЕЧТА

Обсуждая множество серьезных и сверхсерьезных проблем, мы как-то позабыли о нашем прекрасном аппарате — машине времени. Негоже, чтобы такая полезная конструкция ржавела в углу, когда речь идет о более или менее далеких перспективах. Полеты в будущее потому и стали излюбленной темой фантастов, что прогнозы волнуют всех, и в то же время дело это сравнительно безобидное. Особенно если предсказываются вещи радостные и легко понятные.

Предсказатели-пессимисты должны всегда помнить о судьбе Кассандры, дочери троянского царя Приама. Ее сочли ненормальной, а между тем она выдала вполне оправдавшийся прогноз о скорой гибели Трои. Горькая судьба молодой царевны стала предметом многих споров. Как понимать случившееся — элементарная несправедливость или воздаяние по заслугам за бессмысленное карканье? Впрочем, пессимистам всегда трудно добиться признания. Если их пророчества не оправдываются, то они попадают в неудобное положение «врагов прогресса». Если, наоборот, сбываются, то обычно и похвалить бывает некому — на фоне беды их идеи выглядят весьма сомнительной заслугой.

С оптимистами все не так. Предсказав нечто пригожее, они имеют огромные шансы на признательность и современников и потомков. Если же предсказание не оправдывается — опять-таки не до ругани, люди, дескать, хорошего хотели, а теперь надо спасать положение, а не вспоминать об иллюзиях...

Вероятно, все мы просто обречены на оптимизм — мир устроен не так уж безупречно, чтобы баловаться более мрачными вариантами. Другое дело, формы проявления наших прекрасных надежд...

Размышления над всем этим очень полезны, когда пытаешься представить себе некоторые перспективы эксперимента и теории в физике высоких энергий. Включим нашу машину времени и постараемся попасть к тому моменту, когда произойдет покорение границы спектра космических лучей (10^{21} электрон-вольт) ускорительной техникой. Заранее вычислить этот замечательный день, конечно, трудно. Но если отталкиваться от известных сейчас средних темпов роста энергии — примерно десятикратного увеличения за десятилетие, — то можно получить вполне определенный ответ: ждать придется целый век.

Итак, 70-е годы XXI века. Мы выскакиваем из своей машины и сквозь огромную толпу пробираемся к месту, указанному на пригласительном билете.

— Проходите, проходите к телескопу, уважаемые предшественники, — торопит нас распорядитель торжественной церемонии.

— А при чем тут телескоп? — удивляемся мы.

— То есть как это при чем телескоп? — в свою очередь, поражается нашей неосведомленности распорядитель. — Те, кто на ракетах, давно уже улетели...

Странный диалог, не правда ли? Словно бы на разных языках — мы про ускоритель, а он про астрономию. Между тем все очень просто. Прикинув срок запуска грандиозной установки, мы на основе все тех же современных представлений могли бы вычислить и приблизительный размер. И тогда все становится на свои места. Посудите сами — лучший современный синхротрон в Батавии имеет радиус ровно один километр и в принципе (после запланированной к началу 80-х годов замены магнитов) может разгонять протоны до 1000 ГэВ (10^{12} эВ). «Супербатавия» 70-х годов XXI века, на открытии которой мы испытали удивление, должна была бы иметь радиус порядка миллиарда километров!

Пусть за счет тех или иных технических усовершенствований этот размер уменьшится в десять, сто, наконец, в тысячу раз, но и в таком случае распорядитель открытия не обойдется без хорошего телескопа и

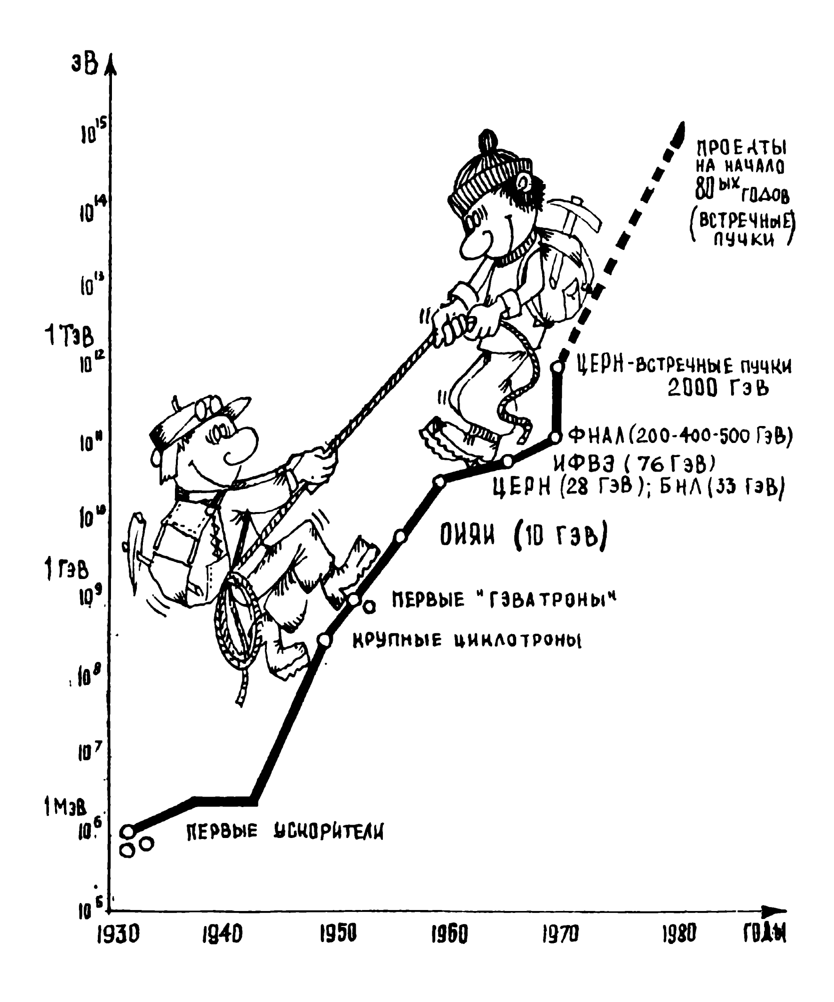
без мощных ракет, чтобы показать людям эту технику. Ситуация явно попахивает «дурной фантастикой» — так и мерещатся старинные проекты телеграфного кабеля Земля — Луна... Где-то мы просчитались!

Конечно, просчитались, и, видимо, не один раз. Если учесть, что выход на 1000 ГэВ произойдет где-то к концу текущего десятилетия, что вполне обосновано существующими проектами, причем практически сразу же будет построено накопительное кольцо, то уже через несколько лет мы сможем исследовать взаимодействия примерно при 2 миллионах гигаэлектрон-вольт. Уже сейчас обсуждаются проекты ускорителей следующего поколения с пучками протонов 10—100 тысяч ГэВ. Ясно, что они будут созданы с учетом лучших технических достижений, прежде всего в области получения сверхсильных магнитных полей в сравнительно компактных установках.

Несмотря на существенные усовершенствования, такой ускоритель окажется, видимо, чрезвычайно дорогостоящим «удовольствием», и его строительство скорее всего будет вестись совместными усилиями Советского Союза, Соединенных Штатов и других высокоразвитых стран. С учетом непременных накопительных колец новое поколение суперсинхротронов обеспечит выход в изучении процессов взаимодействия примерно при 20 миллиардах гигаэлектрон-вольт (порядка 10^{19} эВ!). Правда, произойдет это вряд ли раньше начала 90-х годов нашего века.

После этого ожидается серьезный качественный сдвиг в используемых на практике принципах ускорения, скажем, применение коллективных методов ускорения или других не менее эффективных идей. В связи с таким преобразованием есть все основания предполагать, что на рубеже XXI века будут достигнуты заветные 10^{21} электрон-вольт, по крайней мере, в экспериментах на встречных пучках. Прорыв к протонным пучкам такой энергии для постановки «нормальных» опытов на неподвижной мишени, несомненно, потребует смены (и, возможно, не одной!) общей технической вооруженности и изобретения каких-то новых принципов концентрации энергии.

Не исключено, что основная идея ускорения выдержит испытание и в дальнейшем, но не будем забывать, что это лишь одна из наверняка многих возможностей.



Примерно так выглядит «ускорительный альпинизм». За 40 лет достигнутые на ускорителях энергии выросли почти в миллион раз. Если такая тенденция сохранится впредь, то к концу нашего тысячелетия они достигнут границы изученного спектра космических лучей.

ОИЯИ — Объединенный институт ядерных исследований в Дубне (СССР).
ЦЕРН — Европейский центр ядерных исследований (Швейцария).
БНЛ — Брукхэвенская национальная лаборатория (США).
ИФВЭ — Институт физики высоких энергий в Протвине (СССР).
ФНАЛ — Национальная ускорительная лаборатория имени Э. Ферми в Батавии (США).

Как это нередко случается, при покорении очередных грандиозных рубежей наступает момент переоценки ценностей. При высокой степени освоения околоземного космоса и создании научных баз на Луне, которые появятся в ближайшие десятилетия, могут оказаться выгодными методы искусственной концентрации космических лучей с помощью определенных комбинаций магнитных ловушек. Такому способу можно научиться у самой природы, поскольку примерно так и ускоряются потоки космических частиц в межзвездном и межгалактическом пространстве. Разумеется, этот фантастический проект потребует серьезных сдвигов в получении сверхмощных и устойчивых магнитных полей.

Но это лишь одна и, наверное, не самая красивая возможность. Самое впечатляющее открытие в области методов ускорения частиц до супервысоких энергий, конечно же, впереди! И в этом особая притягательная сила науки — ее перспективы всегда намного фантастичней, чем могут представить себе самые глубокие и дальновидные пророки...

Нечто подобное происходит, разумеется, и в оценках будущего теории. Возможно, что известные частицы так и останутся в роли мельчайших структурных элементов мира, обладающих свойствами отдельных, в определенной степени «самостоятельных» объектов. Но это ни в коей мере не будет означать, что познание микромира достигло последней ступени. Напротив, именно теперь мы и сталкиваемся с совершенно новыми представлениями о структуре. На очереди понимание закономерностей эволюции частиц в области сильного взаимодействия, постижение картины формирования адронов.

Возникновение и постепенная разработка такой точки зрения — факт совершенно неожиданный для традиционных атомистических представлений, для которых более сложные объекты всегда сводились к конструкции из некоторого числа «простейших кирпичиков». Развивающиеся объекты, структура которых предопределяет конкретную программу их поведения, всегда были в некоторой степени чужды физике.

Эта традиция имеет довольно глубокие корни. Уже в фундамент механики Галилея и Ньютона, от которой «и есть-пошла» современная физика, были заложены представления о мире как о сравнительно простой

машине, в основе устройства и работы которой лежали один-два фундаментальных силовых закона. В сущности, классики ни в чем не виноваты. Они вырабатывали свои идеи, отражая окружавший их мир, где венцом технической мысли и впрямь были простые механические устройства. И их величайшая заслуга в том, что они преодолели тяжкие путы средневековой концепции, трактовавшей мир как овеществленный «промысел божий» и считавшей собственно научный способ постижения закономерностей природы отнюдь не обязательным.

Но за истекшие три столетия снова многое изменилось. Механистические представления о всеобщности простых машин оказались бессильными перед целым рядом замечательных открытий. И первый феноменально мощный удар по ним нанесла биология, а конкретно — дарвиновская эволюционная теория. Наблюдаемое многообразие живого мира не есть «богом данное членение тварей», а представляет собой продукт длительного развития, восхождения по десяткам тысяч ступеней от простого к сложному, заявил великий английский ученый. И даже человек не является раз и навсегда установленным «венцом творения и носителем частицы духа господня» — он лишь высший этап эволюции земных существ.

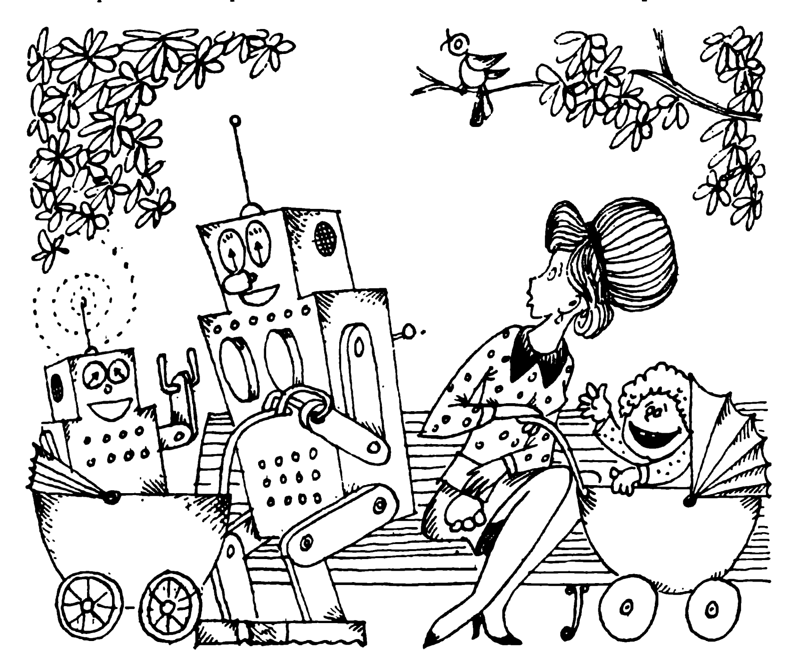
Дарвиновские идеи были встречены не только злобными нападками церковников, но и резкой критикой ряда ученых. Ведь развитие было не так-то просто совместить с представлением о неизменной, раз и навсегда заведенной машине. Представьте себе ситуацию, когда сотни и сотни врачей и физиологов познали внутреннее устройство человеческого тела и пришли к выводу, что это какая-то не слишком мудрёная комбинация из трубок с жидкостью (кровеносной и лимфатической систем) и мышц, способных к механическому действию. Конечно, большинство из них четко видели, что «помысел господень» тут ни при чем, но законы эволюции были слишком трудны для такого уровня.

Потребовались величайшие усилия — открытие законов наследственности, появление генетики, прорыв к молекулярной структуре клетки, чтобы осознать, что, если аналогия с машиной и имеет какой-либо смысл, то речь должна идти о фантастически сложной, саморазвивающейся машине. Чтобы увидеть первые образ-

цы, точнее далекие прообразы технических устройств высокой степени сложности, пришлось ждать до совсем недавних времен, когда родилась кибернетика и общая теория автоматов.

Сейчас мы понимаем, что гигантские электронные машины в принципе можно запрограммировать на саморазвитие. Достаточно сложная кибернетическая машина способна проектировать и с помощью автоматических устройств воспроизводить себе подобных. При дальнейшем усовершенствовании она сможет улучшить программы своих творений, то есть изготовлять нечто более сложное, чем она сама. Так постепенно сформировался технический эквивалент эволюционизирующих биологических систем, но не следует, конечно, забывать, что пока это лишь эквивалент на уровне идей — реальные возможности действующих «электронных мозгов» еще весьма ограничены, пока просто не соизмеримы с тем, чего добилась природа за миллионы и миллионы лет биологической эволюции.

Собственно, в физику идеи о развивающихся объектах проникли сравнительно недавно, хотя и чрезвычай-



но впечатляющим путем. В 1922 году замечательный советский математик А. Фридман на основе эйнштейновской теории тяготения показал, что вселенная могла развиваться из некоторого весьма экзотического состояния, существовавшего порядка 10 миллиардов лет назад. Согласно его идеям весь гигантский звездный мир, наблюдаемый невооруженным глазом и самыми мощными телескопами вплоть до фантастических расстояний 10^{28} сантиметров, прошел множество стадий, причем в очень ранние моменты плотность энергии была чрезвычайно высока. Тогда вселенная ни в малейшей степени не напоминала ту картину, которую мы видим сейчас. Представьте себе, что все галактики спрессованы в комок вещества со средней плотностью, как у атомного ядра. А в еще более ранние моменты плотность намного превышала ядерную, адроны были буквально вжаты друг в друга. Что это было: своеобразное партонное вещество или нечто до сих пор невообразимое?..

Так или иначе, но, судя по хорошо оправдавшей себя фридмановской модели, вселенная проходила через такие состояния, когда не могло существовать обычных элементарных частиц, во всяком случае, они были погружены в среду такой плотности, которая исключала сколь-нибудь макроскопический свободный пробег. Что же предопределило появление наблюдаемого адронного многообразия и где была записана программа формирования сложных микрообъектов?

Так смыкаются, казалось бы, предельно далекие друг от друга проблемы самого большого и самого малого, возникают внешне фантастические взаимосвязи между историей и структурой вселенной в целом и законами поведения частиц при высоких энергиях.

Вот, скажем, такая любопытная история. Предположим, что нам удалось устроить мишень из макроскопического кусочка вещества ядерной плотности и сфокусировать на ней вполне реалистический по современным понятиям протонный пучок из 10^{13} частиц с энергией 1000 ГэВ. При этом в мишени выделилась бы довольно приличная энергия, примерно 10^{13} эрг, то есть того же порядка, что и при взрыве килограмма тринитротолуола. Это, конечно, настоящий взрыв, но ведь для действия взрыва основную роль играет не столько энергия, сколько его мощность, то есть энерговыделе-

ние в единицу времени. Теперь-то мы и придем к фантастическим числам — ведь адроны теряют энергию в ядерном веществе чрезвычайно быстро, примерно за 10^{-23} секунды. Поэтому мощность полученного взрыва окажется эквивалентной той, которая наблюдалась бы при одновременном взрыве приблизительно 100 миллионов мегатонных водородных бомб, то есть около 10^{36} эрг в секунду! Повышая число частиц в импульсе всего в десять раз, а энергию ускорителя — в тысячу раз (а это, как говорится, не за горами!), мы столкнемся примерно с такими же мощными взрывами, какие происходят при вспышках Сверхновых звезд (10^{39} — 10^{41} эрг в секунду). Не хватает совсем немногого: получить в лабораторных условиях комочек ядерного вещества макроскопических размеров, хотя бы порядка пространственного разброса сфокусированного протонного пучка...

Впрочем, с впечатляющими цифрами можно встретиться и при рассмотрении элементарных актов, например, для процесса столкновения тяжелых атомных ядер типа урана с огромными, пока еще не достижимыми энергиями.

Два разных, на первый взгляд бесконечно далеких мира: адроны и звезды... Одно из самых последних завоеваний человеческого разума и одно из первых наблюдений, заставивших согласно красивой легенде впервые распрямиться наших еще не шибко образованных, но уже довольно любопытных пращуров. Но наш смелый век стал стремительно наводить мосты между этими мирами.

Уже в 1932 году Л. Ландау высказал гипотезу о существовании гигантских атомных ядер — нейтронных звезд. Под действием мощных гравитационных сил особо массивные звезды должны сжиматься, и давление в звездных недрах начинает буквально сминать атомы, вдавливая электроны в ядра. Когда большинство электронов провзаимодействует с ядерными протонами, последние превратятся в нейтроны за счет реакции обратного бета-распада с испусканием интенсивного нейтринного излучения. В результате постепенно сформируется своеобразное макроскопическое атомное ядро — нейтронная звезда.

Долгое время идею Л. Ландау рассматривали как красивую гипотезу, но вот в 1967 году были обнаруже-

ны знаменитые пульсары, космические объекты небольшого размера с регулярным и интенсивным излучением. Вскоре теоретики поняли, что единственный способ учесть малый период пульсаций излучения для объектов с характерными звездными массами — предположить, что это и есть невероятно концентрированные нейтронные звезды...

Связи, связи, связи... Наверное, самое главное дело науки — поиск и объяснение связей между близкими и далекими явлениями. Адроны и гравитация — силы, отстоящие друг от друга примерно на 40 порядков десятичной шкалы (сорок!!!) — демонстрируют необходимость в какой-то единой точке зрения. Вы только что видели, что современная теория тяготения в таких принципиально важных пунктах, как строение сверхплотных звезд и ранние этапы развития вселенной, требует привлечения конкретных представлений физики сильных взаимодействий.

Еще более наглядные мосты перебрасываются сейчас между сильными и электромагнитными взаимодействиями. При учете интенсивного рождения адронов обычная электродинамика становится существенно незамкнутой в области высоких энергий — ее следует дополнять законами сильных взаимодействий.

Нечто похожее происходит и с теорией слабых взаимодействий. Во-первых, она устроена гораздо менее надежно, чем электродинамика. И во-вторых, рождение адронов в экспериментах по рассеянию нейтрино (это единственная частица, обладающая только слабым взаимодействием!) показывает все ту же незамкнутость. Похоже, что адроны решили не только продемонстрировать физикам новые варианты устройства собственного мира, но и стали решительно вмешиваться во «внутренние дела» других фундаментальных взаимодействий.

Академик М. Марков в своем выступлении на одном из международных семинаров по физике высоких энергий провел такую любопытную аналогию. А что, если наше представление о четырех силах (сильных, электромагнитных, слабых и гравитационных), которые пока рассматриваются как одинаково фундаментальные, — нечто похожее на древнее членение мира на четыре основные «стихии»: землю, воду, воздух и огонь? Не лежит ли в основе правильных представлений единое рассмотрение всех известных сил?

Построение единой теории, вероятно, и представляет самую большую мечту физиков. Осуществится ли эта мечта — покажет будущее. До сих пор науке известны два великолепных примера построения единых теорий и, конечно же, множество других, менее удачных попыток. Эти примеры таковы.

Г Галилей и И. Ньютон впервые проложили путь к единой трактовке земных и небесных явлений. То, что мушкетные пули падают с башни благодаря тем же силам, которые связывают Землю и другие планеты с Солнцем, было потрясающим открытием, которое позволило создать первую научную картину мира.

Второй пример относится к работам М. Фарадея и Дж. Максвелла, построивших единую теорию электрических и магнитных явлений, которые примерно до середины прошлого века рассматривались как различные эффекты.

После этого успеха предпринимались многочисленные попытки объединить «попарно» те или иные типы взаимодействий. Большую часть своей жизни потратил А. Эйнштейн на единую формулировку теории электромагнитных и гравитационных явлений. Большой путь по объединению теории сильных и слабых процессов проделал В. Гейзенберг.

Эти исследования принесли много интересного, но не достигли цели. Мы не станем проводить подробный анализ случившегося — это, пожалуй, отдельная и весьма глубокая тема. Однако можно обратить внимание на одно наглядное обстоятельство: все удачные попытки классиков прошлого отличает важнейшая особенность — они основаны не на общих соображениях о единстве природы, а на анализе и обобщении экспериментальных закономерностей. Поэтому именно огромные успехи адронной физики, опытное доказательство вмешательства адронных процессов в поведение частиц, которые не должны непосредственно участвовать в сильных взаимодействиях, длительное время давали основание для серьезного оптимизма.

Если бы адроны всегда выглядели как сильно взаимодействующие рыхлые объекты конечного размера, то можно было бы надеяться, что именно они определят характер сил между любыми частицами на сколь угодно малых расстояниях. В этом случае основные трудно-

сти моделей слабых и электромагнитных взаимодействий были бы, по-видимому, устранены.

Но, как вы помните, оказалось, что и сами адроны включают в себя бесструктурные составляющие — кварки-партоны, то есть на очень малых расстояниях ведут себя подобно тем же лептонам. Взаимодействие кварков-партонов с уменьшением расстояний ослабевает — таковы свойства глюонов, переносчиков взаимодействия между кварками.

Ослабление сильных взаимодействий на малых расстояниях и появление точечных составляющих адронов приводят к множеству интересных следствий. Наиболее важное из них то, что теперь уже слабые и электромагнитные взаимодействия становятся на малых расстояниях очень велики — нет силы, которая устранила бы уже известные трудности традиционных моделей.

Однако физики нашли выход и в этой сложной ситуации. Еще в 1967 году американский теоретик С. Вайнберг заметил, что электродинамика и теория слабых взаимодействий, рассмотренные по отдельности, могут сталкиваться с совершенно непреодолимыми трудностями, но, объединяя эти модели, можно добиться удивительных успехов. Оказывается, свойства слабых и электромагнитных сил как бы взаимно устраняют трудности теории при переходе к очень малым расстояниям. В концепции С. Вайнберга силы, которые обычно связывают с особыми слабыми взаимодействиями, являются, по сути дела, одним из проявлений электромагнетизма. Это проявление не могло быть замечено классической физикой, поскольку речь идет о чрезвычайно малых расстояниях, порядка 10^{-17} сантиметра!

Наряду с фотоном взаимодействие теперь должны осуществлять уже знакомые нам заряженные дубль-вэ- и нетральные зэт-мезоны. Но если фотон способен действовать на сколь угодно больших расстояниях, то эти мезоны действуют только на малых участках пространства. Очень важно, что все эти частицы оказываются проявлением некоторого калибровочного поля, и обусловленные ими силы вполне удовлетворительно ведут себя на очень малых расстояниях.

Таким образом, основные надежды современной теории связаны именно с программой объединения электромагнитных и слабых взаимодействий с последующим включением в эту схему кварков и глюонов. В принципе

эта программа позволяет построить непротиворечивую картину с оригинальным, но вполне удовлетворительным поведением сил на малых расстояниях.

Данная точка зрения кажется привлекательной, хотя бы потому, что в ней все действительно элементарные частицы выступают, в определенном смысле, на равной основе. Наблюдаемые адроны также равноправны между собой, но ни в коем случае не являются элементарными объектами и им не следует сопоставлять особые поля.

Как видите, в этой концепции отразились все лучшие достижения более ранних и, конечно, менее совершенных моделей. Даже острая критика теории поля, которую провели сторонники «ядерной демократии», не прошла даром!

Главное впереди

Если окинуть теперь общим взглядом развитие физики элементарных частиц, то можно, следуя методу историков или геологов, условно выделить четыре эры, или эпохи.

Физика подошла к открытию элементарных частиц с вполне выраженной атомистической концепцией. «Атомная эра» с принципиальной точки зрения окончилась с открытием электрона, различных атомных и ядерных излучений и самих атомных ядер. Эти открытия однозначно свидетельствовали о том, что атомы представляют собой сложные системы, а роли элементарных объектов перешли к электрону, фотону и протону.

В этот же период наступает новая «электронно-радиационная эра». Наиболее фундаментальной проблемой становится расшифровка природы электронов, естественной радиоактивности, атомных ядер.

Разумеется, не может идти речь о каких-то абсолютных границах. Между различными эрами существуют изрядные пересечения, когда одна лишь формируется, а другая еще не завершилась полностью. В принципе уже в самом начале века физики знали, что атомы состоят из электронов и каких-то положительно заряженных объектов, но для построения удовлетворительной модели атома пришлось проделать четвертьвековую экспериментальную и теоретическую работу, наконец, создать квантовую механику!

Основные принципы «электронно-радиационной эры» были созданы в конце 20-х — начале 30-х годов, когда квантовая механика была увязана с теорией электромагнетизма и возникла квантовая электродинамика — теория взаимодействия фотонов с электрическими зарядами. С другой стороны, была понята природа естественной радиоактивности. В этот период были открыты два новых типа взаимодействия — сильное и слабое, — которые еще нуждались в подробном и тщательном изучении.

Хотя хорошая версия квантовой электродинамики, позволяющая теоретически рассчитывать все эффекты взаимодействия на не слишком малых расстояниях, была построена только в конце 40-х годов, предвоенное десятилетие определенно характеризуется наступлением новой «ядерно-адронной эры». Собственно, это десятилетие стало преимущественно «ядерным»: были открыты практически все основные свойства атомных ядер, и уже в 1942 году заработал первый ядерный реактор! По-видимому, «ядерно-адронная эра» продолжалась примерно до середины 60-х годов и в послевоенные два десятилетия была преимущественно «адронной». К этому времени зародились и окрепли представления о сложной природе адронов, была отчасти исследована их структура и построены первые варианты кварковой модели.

Конечно, в физике и до сих пор не существует полностью удовлетворительной теории адронов. Нельзя исключить даже того, что для последовательного описания структуры адронов потребуется серьезная перестройка наших представлений. Стоит, однако, отметить одну интересную историко-научную параллель — описание новых структур часто приводило к коренной перестройке физических взглядов. Так, построение модели устройства солнечной системы привело И. Ньютона к новой формулировке всей механики. Аналогичные задачи для атомов и атомных ядер потребовали построения квантовой механики. С чем же придется нам столкнуться на этот раз, выясняя устройство адронов?

С адронами далеко еще не все ясно, но последнее десятилетие определенно можно считать началом «кварк-лептонной эры». Проблема взаимодействия бесструктурных объектов явно выходит на передний план. Тут и новейшие достижения нейтринной физики, позволившие перейти к исследованию слабых взаимодействий при высо-

ких энергиях, и важная задача описания межкварковых сил...

Мы с вами уже в конце 4-й главы обсуждали гипотетическую таблицу истинно элементарных частиц — среди них есть и открытые непосредственно, и замеченные внутри адронов, и те, в существование которых просто верят. Так вот, «кварк-лептонная эра» и связана с попытками перейти к тщательному анализу именно этой необычной таблицы.

Однако новый этап постижения микромира имеет и свои особенности. Например, адронные процессы «множественного рождения» по-прежнему представляют принципиальный интерес. Ведь своеобразие кварков и глюонов в гипотетической таблице частиц может быть выяснено только на основе экспериментов с участием адронов. Почему кварки, обладающие вроде бы похожими свойствами сил, на очень малых расстояниях способны формировать адроны, а лептоны не способны к этому? Очевидно, что элементарная бесструктурная частица (кварк), будучи сама элементом структуры адрона, обладает особыми свойствами, делающими ее в принципе непохожими на другие бесструктурные частицы, например, на лептоны. Хорошо, но... какие это свойства?

Вопросов, как обычно, много, и все они интересны. Чем глубже мы уходим в микромир, тем интересней вопросы и удивительней ответы...

И наконец, последний вопрос: что нас ожидает впереди, какова очередная «эра»?

Пока практически в стороне остаются гравитационные взаимодействия. Возможно ли, следовательно, наступление «гравитационной эры»?

Это воистину жгучий вопрос. Силы тяготения очень малы по сравнению с другими, но зато они универсальны, действуют абсолютно на любые частицы и не подвержены какой-либо экранировке. Именно благодаря такой универсальности А. Эйнштейн и построил теорию тяготения, основанную на идее, что гравитация представляет собой свойство пространства-времени, а не отдельных видов материи.

Несмотря на всю привлекательность, эта теория оставалась все время в стороне от физики микромира, и не только из-за слабости гравитационного взаимодействия элементарных частиц, но и потому, что она так и осталась классической теорией.

В сущности, гравитация еще не подвергалась экспериментальному исследованию в микромире. Нам известно, как притягиваются друг к другу массивные макроскопические тела, скажем, планеты. Известно, что элементарные частицы также притягиваются к большим телам, например, путь фотона, пришедшего от далекой звезды, искривляется в поле тяготения Солнца.

Однако никто не знает, как взаимодействовали бы между собой за счет сил тяготения две элементарные частицы. К сожалению, природа не подарила нам такой элементарной частицы, которая была бы способна только к гравитационным взаимодействиям, подобно тому, как нейтрино участвует только в слабых взаимодействиях. Из-за этой несправедливости мы не можем пока выделить гравитационные процессы микромира в чистом виде. Любые другие взаимодействия просто «забивают» гравитацию. Разве что на фантастически малых расстояниях — по современным оценкам порядка 10^{-33} сантиметра — тяготение должно превзойти все остальные силы...

Должно, если допустить, что оно действует между частицами так же, как и между макроскопическими объектами. В таком случае мы неявно предполагаем, что само пространство и время в очень малых объемах такое же, как и в очень больших. Но вот ведь в чем проблема: а существуют ли сами пространство и время в столь малых областях, могут ли они восприниматься нами так, как пространство нашей комнаты или время, отсчитанное по будильнику?

А вдруг задолго до наступления «гравитационной эры» откажет один из самых фундаментальных эталонов: модель пространства-времени? Это необычная, но интригующая возможность — ведь пространство-время, можно сказать, универсальная арена, на которой происходят все физические явления.

Идеи об изменении представлений о пространстве в очень малых областях развивались уже несколько десятилетий. Они возникли в определенной степени как реакция физиков на неудовлетворительное поведение электромагнитных сил на очень малых расстояниях. А могут ли частицы вообще подходить друг к другу сколь угодно близко? Не будут ли они всегда разделены каким-то, пусть очень малым, но конечным интервалом? Такие вопросы ставили перед собой теоретики еще в 30-х годах.

Если никакие частицы не способны приближаться друг к другу вплотную, то это положение проще всего отнести за счет свойств самого пространства. Оно может, скажем, не быть непрерывным, а состоять из отдельных квантов — протяженностей конечных размеров. А частицы могут находиться на расстояниях, пропорциональных величине этого кванта, умноженной на целое число. Таким образом, появляется как бы универсальная линейка, которая должна целое число раз укладываться на любом отрезке физического пространства. Размер кванта пространства называется **фундаментальной длиной**.

Постепенно модели квантованного пространства приобретали все более четкую математическую структуру и физическую интерпретацию. Благодаря глубокой идее Г Снайдера, связавшего свойства квантованного пространства-времени с поведением импульсов частиц, и дальнейшему развитию и расширению этой идеи в работах советских теоретиков Ю. Гольфанда, И. Тамма, В. Кадышевского возник многообещающий подход к теории взаимодействия частиц в квантованном пространстве.

В настоящее время эта теория наиболее активно развивается в Дубне группой профессора В. Кадышевского. Возможно, самым впечатляющим результатом этого подхода оказалось моделирование партонного эффекта. На малых расстояниях между частицами, когда начинает чувствоваться фундаментальная длина, рассеяние выглядит так, как если бы в нем принимали участие точечные партоны.

Так что вероятней всего теория квантованного пространства может не хуже справиться с проблемой малых расстояний, чем концепция калибровочных полей.

Если окажется, что силы, возникающие при обмене глюонами, фотонами, а также дубль-вэ- и зэт-мезонами, то есть в любых известных взаимодействиях, ведут себя совершенно одинаково на очень малых расстояниях, то этот факт скорее всего и будет означать появление новых универсальных свойств пространства в малом.

Иными словами, само развитие теории поля, которая справляется со многими трудностями, может привести к новой модели пространства. Однако это произойдет только при переходе к значительно меньшим расстоя-

ниям, чем мы изучаем сегодня — не более 10^{-20} сантиметра.

Не исключена и более радикальная точка зрения, что фундаментальная длина составляет порядка 10^{-17} сантиметра, и теория слабых взаимодействий вообще не потребует введения особых квантов-переносчиков (дубльвэ- и зэт-мезонов). Эта гипотеза может быть проверена в не столь уж и далеком будущем, сразу после запуска накопительных колец на суперсинхротронах Батавии и ЦЕРНа.

Итак, вполне вероятно, что вместо истинно элементарных частиц, связанных необычными силами, Природа предложит нам более или менее привычные силы, но в совершенно необычном пространстве. А может быть, появится какой-то новый третий путь, который и приведет к цели.

Наступит ли «гравитационная эра»? Или «эра квантованного пространства»? Сможем ли мы достичь в ближайшее время единой трактовки кварков и лептонов? Будут ли наконец открыты сверхтяжелые переносчики слабых взаимодействий?

Ответы на эти и многие другие вопросы принадлежат будущему. Прекрасному и волнующему будущему науки, которое начинается сегодня!

СОДЕРЖАНИЕ

Потупа А. С.
П64 Бег за бесконечностью. М., «Молодая гвардия», 1977.
224 с. с ил. (Эврика).

В книге рассказывается о современных представлениях об одной из самых быстроразвивающихся фундаментальных наук — физике элементарных частиц. Основное внимание уделено описанию сильновзаимодействующих частиц — адронов, их поведению в различных реакциях при высоких энергиях.

530.4

П $\frac{70300-243}{078(02)-77}$ 064—77

ИБ № 777

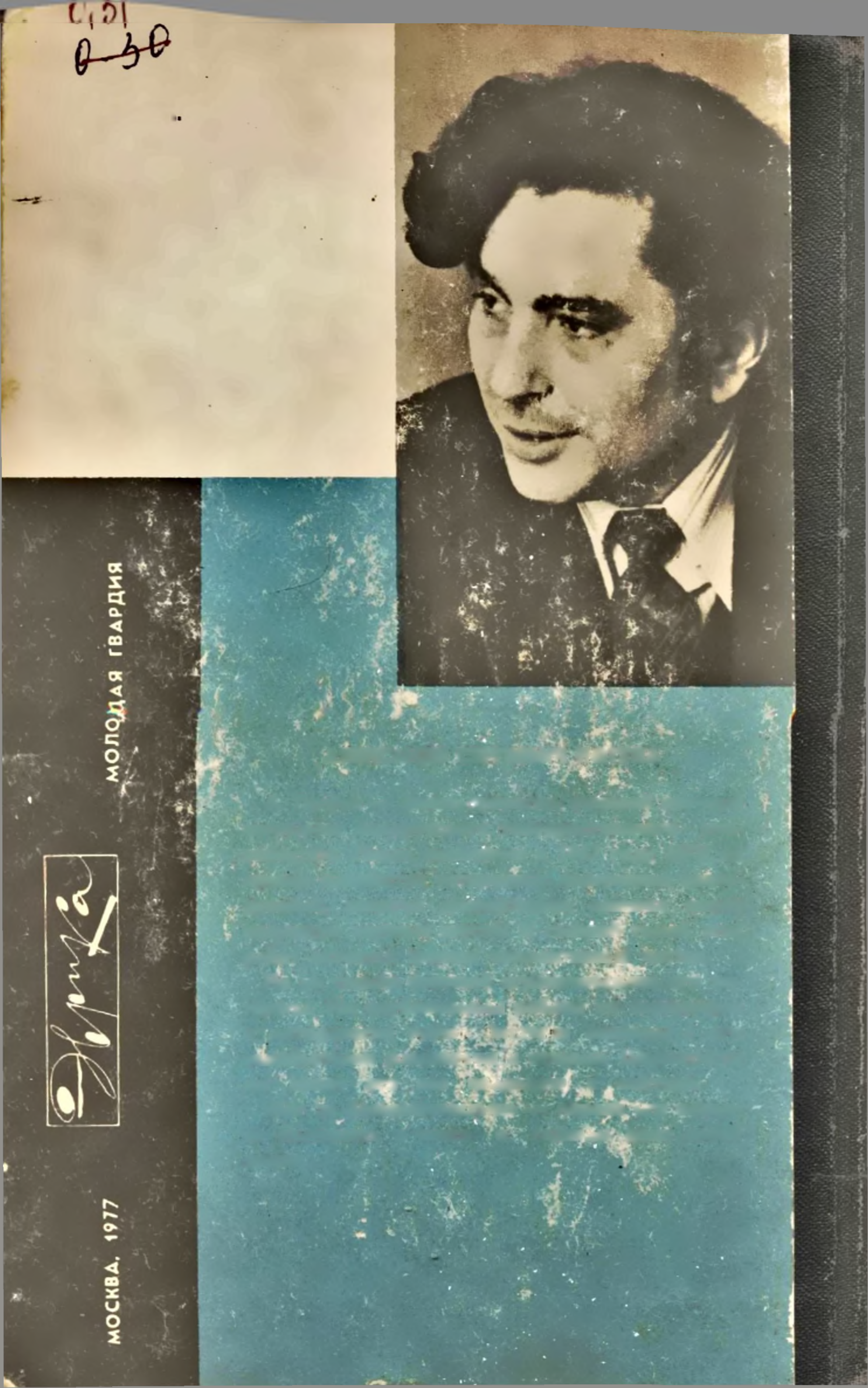
Александр Сергеевич Потупа

БЕГ ЗА БЕСКОНЕЧНОСТЬЮ

Редактор В. Федченко
Художник К. Мошкин
Художественный редактор А. Косаргин
Технический редактор Н. Михайловская
Корректоры Т. Пескова, Е. Самолетова

Сдано в набор 23/III 1977 г. Подписано к печати 30/VIII 1977 г. А06649. Формат 84×108[1]/[32]. Бумага № 1. Печ. л. 7 (усл. 11,76). Уч.-изд. л. 12,2. Тираж 100 000 экз. Цена 61 коп. Т. П. 1977 г., № 64. Заказ 390.

Типография ордена Трудового Красного Знамени издательства ЦК ВЛКСМ «Молодая гвардия». Адрес издательства и типографии: 103030, Москва, К-30, Сущевская, 21.


МОЛОДАЯ ГВАРДИЯ
МОСКВА. 1977